Aus der Chirurgischen Universitätsklinik zu Berlin (Ziegelstraße)
(Direktor: Prof. Dr. Rostock)

Die Ultraschallwellen

(Eine Zusammenfassung mit besonderer Berücksichtigung ihrer Wirkungen in Biologie und Medizin, das Schrifttum bis zum Jahre 1940 enthaltend.)

INAUGURAL-DISSERTATION
zur Erlangung des medizinischen Doktorgrades an der Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin

vorgelegt von

Friedrich Schubotz
aus Berlin-Lichterfelde

Tag der Promotion: 23. 4. 1941

Druck: Karl und Richard Hoffmann, Charlottenburg, Schillerstr. 44

M 54

Gedruckt mit Genehmigung

der

Medizinischen Fakultät der Universität Berlin

Dekan: Prof. Dr. Kreuz

Referent: Prof. Dr. Haase

Korreferent: Prof. Dr. Rostock

Meinen lieben Eltern!

Seit einigen Jahren wird versucht, der Medizin eine neue Art von Strahlen nutzbar zu machen: Die Ultraschallwellen. Es sind dies longitudinale Schwingungen wie ein hörbarer Ton, Schallwellen, aber von so hoher Frequenz, daß sie das menschliche Ohr nicht mehr als Sinneseindruck wahrnehmen kann. Die längste Welle, die das Ohr noch als Ton, nicht als Brummen empfindet, ist das Subcontra-C (C_{-3}) mit einer Schwingungszahl von 16 Hz und einer Wellenlänge von etwa 20 m in Luft. Junge Menschen vermögen Töne bis etwa zur Schwingungszahl von 20 000 Hz (Wellenlänge rund 1,7 cm) zu hören. In der Musik werden im allgemeinen nur Töne zwischen 16 und 4000 Hz verwendet. Auf elektrischem Wege können die unhörbaren Schallwellen von großer Stärke mit Schwingungszahlen bis zur Größenordnung von 10^6 Hz erzeugt werden.

Das Ultraschallgebiet umfaßt somit einen Frequenzbereich von rund 15 Oktaven. In Wellenlängen ausgedrückt bedeutet dies, daß die Ultraschallwellen in Luft (Schallgeschwindigkeit $v = 330$ m/sec) den Wellenlängenbereich von 1,6 cm bis $0{,}6 \cdot 10^{-4}$ cm, in Flüssigkeiten ($v \sim 1200$ m/sec) den Bereich von 6 cm bis $2{,}4 \cdot 10^{-4}$ cm und in festen Körpern ($v \sim 4000$ m/sec) den Wellenlängenbereich von 20 cm bis $8 \cdot 10^{-4}$ cm überstreichen. Die kürzesten Ultraschallwellen kommen somit schon in die Größenordnung der Wellenlänge des sichtbaren Lichts. Während das Licht jedoch in Querwellen schwingt, haben wir es beim Ultraschall mit Längswellen zu tun. Bei Querwellen wechseln Wellenberge und Wellentäler, bei Längswellen Verdichtungen und Verdünnungen. Längswellen entstehen in allen volumelastischen Körpern, also in gasförmigen, flüssigen und festen Körpern. Das Licht ist jedoch eine transversale Aetherschwingung, das heißt, es bewegt sich durch den Raum hindurch, ohne daß der Raum mit Materie erfüllt zu sein braucht; es ist eine transversale Schwingung,

d. h. es zeigt die Erscheinung der Polarisation, welche Erscheinung als sicherer Beweis für eine transversale Schwingung gilt.

Gerade durch die Kleinheit der Wellenlänge haben sich besondere Anwendungen des Ultraschalls auf den verschiedenen Gebieten ergeben. Viele Untersuchungen mit Schallschwingungen, insbesondere die Schallgeschwindigkeitsmessungen, lassen sich bei Benutzung von Ultraschall auf sehr viel kleinerem Raum vornehmen als mit den früher benutzten Schallschwingungen des Hörbereichs, ohne daß Einflüsse von Gefäßwandungen usw. stören. Die Gesetze der Akustik des Hörbereichs gelten unverändert auch für das Gebiet des Ultraschalls, nur treten bei den Ultraschallschwingungen noch besondere Erscheinungen auf, die man bisher bei den hörbaren Schallschwingungen nicht beobachtet hat. Diese Ultraschallwellen bewirken nämlich äußerst heftige Erschütterungen des Gefüges der Stoffe, die sie durchlaufen. Auf kleine Fische können sie tödliche Wirkungen ausüben. Auch haben sie bereits industrielle Bedeutung gewonnen, z. B. zur Herstellung sehr fein verteilter Emulsionen (feinkörniger photographischer Filme usw.).

Zuerst sei auf die Erzeugung und auf die wichtigsten physikalischen Eigenschaften des Ultraschalls hingewiesen.

Die Ultraschallwellen niederer Frequenz (bis rd. 100 kHz) werden vorwiegend mit mechanischen Erzeugern, besonders konstruierten Pfeifen, z. B. der Galtonpfeife und dem Gasstromschwinggenerator hervorgebracht. Die von Edelmann (1) gebaute Galton- oder Grenzpfeife, die in Bezug auf Amplitude und Frequenz recht konstante Schallschwingungen bis zu etwa 40 kHz liefert, wird insbesondere für physiologische Zwecke verwandt. Zur Erzeugung größerer Schallenergien, in Luft bis zu etwa 50 Watt Schallleistung, hat Hartmann (2) den sog. Gasstromschwinggenerator gebaut. Hiermit lassen sich in Luft schon Schallschwingungen bis zu 120 kHz erzeugen; bei Benutzung von Wasserstoff kommt man infolge der rund 4mal größeren Schallgeschwindigkeit bis zu 500 kHz. Bekanntlich lassen sich Schallschwingungen auch dadurch erzeugen, daß man einen Stab aus Glas oder Metall zu elastischen longitudina-

len Eigenschwingungen anregt. Nach diesem Prinzip hat Holtzmann (3) ein Verfahren angegeben, um dauernd einen solchen Stab auf mechanischem Wege zu kräftigen elastischen Schwingungen anzuregen, sodaß vom freien Ende Ultraschallwellen abgestrahlt werden. Mit dieser Anordnung wurde noch eine Schallfrequenz von rund 33 kHz erreicht, wobei die Schalleistung etwa 100—150mal größer als bei der normalen Galtonpfeife war.

Da diese so erzeugten Schwingungen in derselben Weise an die Umgebung weitergegeben werden, wie akustische, optische oder elektrische Erregungen, wird bei ihnen mit demselben Recht wie dort von einer Strahlung gesprochen. Die physikalischen Bedingungen der Ultraschallstrahlen sind genau die gleichen wie z. B. die Bedingungen für die Strahlen in der Optik. — Der Strahl gibt hierbei die Fortpflanzungsrichtung der jeweiligen Erregung an. (Vergleich mit Lichtstrahl und Lichtwellen!)

Die Aehnlichkeit des Verhaltens der Strahlen vom Ultraschall zu denen des Lichts mag folgender interessante Versuch veranschaulichen:

Altberg (4) ist es gelungen, aus dem bei Funkenentladungen bei Kondensatoren erzeugten Frequenzgemisch akustischer Schwingungen durch Reflexion an Spiegeln die kurzen akustischen Wellen auszusieben und zu isolieren; er hat sie zu Messungen, insbesondere Absorptionsmessungen benutzt.

Um höhere Frequenzen zu erreichen, macht man sich den „Magnetostriktionseffekt" oder den „umgekehrten piëzoelektrischen Effekt" zu nutze. Auf Grund dieser zwei Effekte hat man verschiedene Ultraschallerzeuger gebaut.

Hier sei zuerst der magnetostriktive Ultraschallgeber näher betrachtet, welcher heute bei vielen Versuchen über Ultraschall weitgehende praktische Verwendung findet.

Er basiert, wie schon der Name sagt, auf dem Magnetostriktionseffekt.

— „Magnetostriktionseffekt" oder „Jouleeffekt" (6) nennt man die physikalische Erscheinung, daß ferromagnetische Stäbe, wenn sie in stromdurchflossenen Drahtspu-

len stecken, im Rhythmus des Wechselstroms Verkürzungen und Ausdehnungen erfahren.

— Von diesen schwingenden Stäben gehen nun die Ultraschallwellen aus!

Es sind mehrere Apparate konstruiert worden, bei denen die Stäbe in verschiedener Weise zu Schwingungen angeregt werden. Pierce (7, 8) hat als einer der ersten Magnetostriktionssender gebaut. Der Hauptvorteil dieser magnetostriktiven Ultraschallgeneratoren liegt in der Einfachheit und Billigkeit ihres Aufbaues. Bei den niedrigen Ultraschallfrequenzen lassen sich beträchtliche Schallenergien erzeugen, ohne daß man auch bei zeitweiliger Ueberlastung der Anordnung eine Zerstörung des schwingenden Systems zu befürchten hat. Die Nachteile bestehen in dem nach oben begrenzten Frequenzbereich und in einer verhältnismäßig starken Temperaturabhängigkeit der Frequenz.

Der zweite wohl am häufigsten verwandte Apparat, mit dem man die höchsten heute erreichbaren Schallfrequenzen erzeugen kann, ist der „piëzoelektrische Ultraschallgeber". Im Prinzip verwendet man ausschließlich einen schwingenden Kristall, der elektrisch erregt wird. Es können dazu folgende Kristalle: Turmalin, Quarz, Zinkblende, Natriumchlorat, Weinsäure, Kieselzinkerz, Rohrzucker, Seignettesalz und nach neueren Untersuchungen auch noch viele andere Kristalle verwandt werden.

Bei allen tritt der sogenannte Piëzoeffekt (Piëzo = Druck) auf.

Unter „Piëzoeffekt" oder „Piëzoelektrizität" versteht man das Auftreten elektrischer Wechselspannungen an gewissen Kristallen, sobald deren polare Achse mechanischen Druckveränderungen ausgesetzt wird, d. h. durch mechanische Einwirkungen Verkürzungen oder Dehnungen erfährt. Die Häufigkeit (Frequenz) der entstehenden Stromwechsel entspricht der Häufigkeit ihrer mechanischen Ursachen.

Diese Erscheinung läßt sich nun umkehren: Legt man an die beiden (möglichst planparallelen) Flächen, die die genannten Vorbedingungen erfüllen, eine elektrische Wechselspannung an, so führt die Kristallscheibe „Dickenschwingungen", die jeweils den Frequenzen des angeleg-

ten Wechselstroms entsprechen, aus. Diese Erscheinung ist der „umgekehrte Piëzoeffekt".

Bei den beiden genannten Verfahren werden also hochfrequente elektrische Schwingungen in hochfrequente mechanische Schwingungen umgeformt. — Der (piëzoelektrische) Kristall erleidet also in der Frequenz einer angelegten Wechselspannung in der Richtung der polaren Achse fortgesetzt Verlängerungen und Verkürzungen. Diese Längenveränderungen sind als mechanische Schwingungen zu betrachten und stimmen in ihrer Frequenz mit der des erregenden Wechselstroms überein.

Ist nun diese Frequenz des Wechselstroms besonders hoch (z. B. 300 000 pro sec.), so wird bei guter Resonanz des Quarzes die Zahl der Dickenschwingungen der Kristallscheibe gleichfalls besonders hoch sein. Im Resonanzfalle wird dabei die Quarzscheibe zu verhältnismäßig großen mechanischen Schwingungen von hoher Frequenz veranlaßt.

Von diesen schwingenden Kristallen gehen nun (genau wie von den schwingenden Stäben der Magnetostriktionssender) die Ultraschallwellen gleicher Frequenz aus.

Die gewöhnlichen im Hörfrequenzgebiet benutzten elektroakustischen Schallgeber (Telefon, Lautsprecher) versagen im Ultraschallgebiet, da ihre schwingenden Massen eine zu geringe Eigenfrequenz (bzw. eine zu große Trägheit) haben, die sich aus technischen Gründen nicht beliebig erhöhen läßt.

Diesen schwingenden Systemen gegenüber sind die Piëzokristalle praktisch ohne Massenträgheit. Ihre Schwingungsfrequenz kann bis zu Zahlen gesteigert werden, die für sonstige mechanische Schwingungen, z. B. „elastische" unerreichbar sind; und die, wie schon oben erwähnt, auch über die höchsten wahrnehmbaren akustischen Schwingungen, z. B. einer Stimmgabel oder Violinsaite, welches ja gleichfalls mechanische Schwingungen sind, weit hinausgehen.

In den wenigen Fällen, in denen eine solche Erhöhung der Eigenfrequenz (Ueberwindung der Trägheit der Masse des schwingenden Körpers) möglich ist, wie z. B. beim Bändchentelefon, sinkt dann aber der Wirkungsgrad für

die Umwandlung elektrischer in akustische Energie sehr stark ab.

So hat Mülwert (5) ein Bändchentelefon konstruiert, das noch Frequenzen bis 200 kHz liefert, aber nur eine Schallleistung von rund 0,02 Watt abgibt. Da jedoch gerade dieser Apparat in der Medizin (Besserung bzw. Heilung von Schwerhörigkeit) therapeutisch schon eine gewisse Bedeutung erlangt hat, wird auf denselben später noch besonders eingegangen.

Zuerst entdeckt, ihren Gesetzen nach und erscheinungsmäßig ausführlich beschrieben wurde die Piëzoelektrizität (wörtlich: Druckelektrizität) im Jahre 1880 von den Gebrüdern J. und P. Curie (11). Unter den neueren Veröffentlichungen verdient wohl das 1938 erschienene Buch von A. Scheibe (12) die meiste Beachtung. Der Quarz ist der zur Erzeugung der Ultraschallwellen heute gebräuchlichste Kristall.

Mit Hilfe des umgekehrten Piëzoeffekts („umgekehrt, weil hier die Elektrizität das Primäre ist und nun ihrerseits die Veränderungen am Kristall hervorruft) konnten Geräte entworfen werden, bei denen von den schwingenden Flächen (Piëzoquarzen) Ultraschallwellen abgestrahlt wurden. — Wir sprechen auch hier wie beim Licht, wenn Wellen sich in einer bestimmten Richtung fortpflanzen, von Strahlen!

Um dem Leser eine möglichst gute Vorstellung von der Ultraschallerzeugung auf diesem Wege zu verschaffen, sollen als Beispiel hier Angaben über einen Kristall gebracht werden, der zur Erzeugung von Ultraschallschwingungen einer Frequenz von ca 3000 000 pro sec. angewandt wird. — Es werden dafür Quarzscheiben hergestellt von rund 70 mm Durchmesser und einer Stärke von rund 10 mm. Diese Quarzscheiben werden zwischen Spezialelektroden gehaltert und mittels eines Hochfrequenzsenders von 1—2 kW zum Schwingen gebracht.

Cady (13) fand als erster, daß die Stärke (Amplitude) der hier erzeugten Schwingungen am größten ist, wenn eine Resonanz zwischen der Frequenz des elektrischen Wechselstroms und der Eigenschwingung des Schallgebers (Quarzkristall) besteht. Daher wird der Hochfre-

quenzsender so abgestimmt, daß derselbe mit der Quarzeigenfrequenz übereinstimmt. Da die im Resonanzfalle erzeugten mechanischen Schwingungen der Quarzscheibe doch immerhin so groß sind, daß die Gefahr des Zerplatzens für die Scheibe bei gelegentlicher Beanspruchung über ihre Elastizitätsgrenze hinaus gegeben ist, wird die Fassung und die Scheibe nun in einem Oelgefäß angeordnet. Hierdurch werden die mechanischen Schwingungen auf das Oel übertragen, und alle Gegenstände, welche in dieses Oel getaucht werden, werden nun ebenfalls zu Ultraschallschwingungen angeregt. Auch das Kaiser Wilhelm-Institut hat mit derartigen Ultraschallwellenquarzen gearbeitet und besonders die Einwirkung von Ultraschallwellen auf Oele, insbesondere thixotrope Gallerten untersucht. (Hergestellt werden solche Quarzscheiben von der Radioaktiengesellschaft D. S. Loewe, Berlin-Steglitz; der Preis eines fertigen Kristalls, wie oben beschrieben, beträgt ca 335.— RM.).

Mit den piëzoelektrischen Schallerzeugern lassen sich Intensitäten bis zu 10 W/cm^2 erreichen, wohingegen die normale Lautstärke eines Rundfunklautsprechers bei Zimmerstärke etwa 10^{-9} W/cm^2 beträgt. In Luft werden die Ultraschallwellen sehr stark absorbiert, man bedient sich daher zu Untersuchungen über die Wirkung derselben meist anderer Medien, hauptsächlich Oel. Oberhalb des Quarzes entsteht in dem Oel eine lebhafte Flüssigkeitsbewegung, die bei höheren Spannungen so stark wird, daß sie deutlich als Oelfontäne sichtbar ist. Man spricht dabei von einem Schallstrahlungsdruck. Er ist ein sichtbarer Beweis für die ausgesprochene Richtungsbewegung der Ultraschallwellen. In den entstehenden Oelsprudel bringt man die zu untersuchenden Präparate. — Es sind auch hier die verschiedensten Anordnungen und Systeme (14, 15) entworfen worden, auf die im einzelnen einzugehen jedoch zu weit führen würde. Erwähnt sei nur die von Grützmacher (16) angegebene Möglichkeit, dem sendenden Quarz eine hohlspiegelartige Form zu geben und auf diese Weise die davon ausgehenden Ultraschallwellen in einem Punkt zu sammeln, um

dort eine große Verstärkung der Ultraschallwirkung zu erzielen.

Anschließend sei der schon oben erwähnte Apparat, den Mülwert (5) in Zusammenhang mit seinen Versuchen zur Heilung der Schwerhörigkeit konstruiert hat, erläutert. Mülwert war der Ansicht, daß für seine Zwekke die bisher vorhandenen Apparate nicht genügten. So brauchbar die piëzoelektrische Erregung des Quarzes mit ihren starken Schwingungen für die bekannten biologischen Versuche von Wood und Loomis (17) in Flüssigkeiten waren, hatten sie doch gewisse Nachteile in ihrer Anwendbarkeit beim Menschen. Dazu gehörte, daß mit einem Kristall bestimmter Abmessung nur der Grundton und einige Obertöne erzeugt werden können und für einen größeren Bereich von Frequenzen ein entsprechender Satz von Kristallen erforderlich ist. Für „tiefe" Töne in der Nähe der oberen Hörgrenze werden die Abmessungen unangenehm; für den Ton von 30 000 Hz muß der Quarz bereits etwa 9 cm lang sein, sodaß sich bei der elektrischen Erregung Schwierigkeiten ergeben. Nebengeräusche sind nicht ganz zu vermeiden. Insbesondere entstehen bei stärkerer Erregung u. U. kleine Lichtbögen zwischen den Elektroden und dem Kristall, deren Zischen stört. Bei der von Mülwert angegebenen neuen Methode, die für zahlreiche Untersuchungen bereits verwendet wurde, haben wir eine entsprechend dem Biot-Savartschen Gesetz erregte Membrane, die in einem starken Magnetfeld angeordnet und selbst von den elektrischen Wechselströmen durchflossen ist. Als Membran dient eine möglichst dünne und überhaupt knapp dimensionierte Metallfolie, eine sog. „luftleichte" Membran. Es bietet sich nun hier die Möglichkeit, den die Folie durchfließenden elektrischen Strom mit bekannten elektrischen Meßeinrichtungen genau konstant zu halten. Wenn auch für eine gleichbleibende magnetische Feldstärke gesorgt ist, so hat man es doch in der Hand, abgesehen von allen Einzelheiten der Anordnung, die Intensität der akustischen Wellen auf einem unbedingt konstanten Wert zu halten, selbstverständlich auch die Frequenz. Auf die physikalischen Einzelheiten der Methode kann hier nicht weiter ein-

gegangen werden. Jedenfalls beherrscht man mit ihr einen Frequenzbereich von 10 000 Hz bis etwa 450 000 Hz lückenlos innerhalb einer Anordnung und ist frei von Nebengeräuschen. Es dürfte dies für physiologische Messungen sicher sehr wertvoll sein. In Anbetracht der bei der Behandlung der Schwerhörigkeit empfohlenen Schwankungen der akustischen Frequenzen sei darauf hingewiesen, daß die vorstehende Methode bei dem derzeitigen Stande der verfügbaren Schwingungserzeuger die einzige zu sein scheint, mit der in dem angegebenen Frequenzbereich bei beliebigen Schwingungszahlen der Grundfrequenz derartige Wechsel erzielt werden können. Mit diesem Mülwert'schen Strahler, kurz als „Ue-Strahler" bezeichnet, sind seit der Zeit viele Versuche unternommen worden und oft zur vollsten Zufriedenheit ausgefallen.

Die allgemeinen Eigenschaften der Schallwellen, wie Reflexion, Brechung, Beugung und Interferenz lassen sich mit Ultraschallwellen infolge der kleinen Wellenlänge auf kleinstem Raum und in einfacher Form studieren. Die bekannten Gesetze der Wellenlehre (der Akustik sowohl wie der geometrischen Optik) behalten ihre Gültigkeit: So werden beispielsweise Ultraschallwellen von Prismen aus festen Stoffen, z. B. Aluminium, gebrochen, wie Lichtstrahlen von Glasprismen; oder gibt man, wie schon erwähnt, der Oberfläche des schallaussendenden Quarzes Hohlspiegelform, so werden die Schallstrahlen im Brennpunkt vereint.

Von den in der Akustik des Hörbereichs benutzten Methoden zum Nachweis und zur Messung der Wellenlänge, der Intensität und der Absorption von Schallwellen lassen sich nur wenige Verfahren auch im Ultraschallgebiet anwenden und dann auch nur im Gebiet der tieferen Ultraschallfrequenzen, wo die Schallwellenlänge noch in der Größenordnung von cm liegt. Bei den höheren Ultraschallfrequenzen versagen aber diese Verfahren, da die Indikatoren im allgemeinen zu groß gegen die Ultraschallwellenlängen werden und zu Störungen der Schallausbreitung Anlaß geben. Dagegen gibt es im Ultraschallgebiet gerade bei den hohen Schallfrequenzen eine Reihe von besonderen Verfahren, die Schallwellen sowohl sichtbar zu

machen, als auch mit großer Genauigkeit ihre Wellenlänge und Intensität zu messen. Es sind dies im wesentlichen die in neuerer Zeit von verschiedener Seite angegebenen optischen Verfahren, durch die eine ganze Reihe von weiteren Anwendungsgebieten des Ultraschalls erschlossen wurde. Im folgenden seien einige der bekannten Verfahren herausgegriffen; die von Kundt (18) bereits 1866 angegebene Methode, stehende Schallwellen durch Staubfiguren sichtbar zu machen, läßt sich bei Ultraschallwellen anwenden, solange die Wellenlänge die Größenordnung eines Millimeters nicht unterschreitet. Der Staub ordnet sich in den Knotenstellen der Schallschwingungen in Form von schmalen Rippen an, die im Abstand von einer halben Wellenlänge auftreten und somit eine wenigstens rohe Messung der Schallwellenlänge ermöglichen. Auf der Weiterentwicklung des Staubfigurenverfahrens ergab sich ein weiteres Verfahren für die Anwendung auf Flüssigkeiten. Es besteht darin, daß in einem Beobachtungsgefäß eine Ebene etwas unterhalb der Mittelachse des Ultrastrahlers angebracht und dann feiner Aschenstaub möglichst gleichmäßig aufgestäubt wird, während der Strahler arbeitet. Dann ordnen sich die Staubteilchen den Schallwellen entsprechend; nachdem das flüssige Medium langsam abgelassen worden ist, kann man die Staubbilder sowohl photographieren als auch ausmessen und so aus Wellenlänge und der elektrisch gemessenen Frequenz die Schallgeschwindigkeit bestimmen.

Bei der Schallintensitätsmessung sind die Untersuchungen in flüssigen Medien wohl als die wichtigsten anzusehen. Untersucht wurde der schon oben besprochene „Schallstrahlungsdruck". — Eine ausführliche Arbeit hierüber veröffentlichte W. T. Richards (19), der als einziges zuverlässiges Gerät (bei Flüssigkeiten) einen Trichter mit exponentiell geformter Oeffnung und einer angesetzten Kapillare von 2,5 bis 0,5 mm Durchmesser ansieht, bei dem die Steighöhe der Flüssigkeit über den Ultraschallerzeuger als Maß für den Schalldruck bzw. die Intensität der Schallstrahlung dient. Auch darüber sind andere Verfahren bekannt.

Ich will in dieser Zusammenstellung nur kurz die Methode beschreiben, mit der Dognon und Biancani (20) bei ihren biologischen Versuchen die Stärke der dabei verwandten intensiven Ultrastrahlung prüften. — Ein etwa 5 cm langer und 5 mm dicker Glasstab, der an seinem unteren Ende tellerförmig verbreitert ist, ist mit seinem oberen Ende an dem Ende eines Reagenzglases angeschmolzen, das mit Oel gefüllt ist und ein Thermometer enthält. Das untere Ende des Glasstabes wird in das zu untersuchende Schallfeld getaucht, die Schallwellen laufen dann durch den Stab in das Oel, wo sie absorbiert werden. Die in einer bestimmten Zeit entwickelte Wärme ist ein Maß für die Schallintensität und wird durch das Thermometer angegeben.

In Umkehrung der Erzeugung von Ultraschall durch den Piëzo-Quarz-Sender kann man den Quarz auch als Empfänger gestalten und so zu Ultraschallempfang und Messung verwenden. Langevin (21) hat als erster auf die Anwendung solcher piëzoelektrischer Schallempfänger hingewiesen. Dies Verfahren ist später von Hehlgans (22) noch weiter ausgebaut worden.

Ausgehend von der klassischen Schlierenmethode, mit der bereits 1866 A. Toepler (23) Schallwellen, die von einem Funken erzeugt wurden, sichtbar gemacht hat, sind verschiedene neuere optische Verfahren zum Nachweis von Schallwellen in den letzten Jahren durchgebildet worden. Unter anderem hat Pohlmann (24) an der Verbesserung der Methode gearbeitet.

Die ersten Versuche zu Schallgeschwindigkeitsmessungen bei Gasen mit dem sog. „akustischen Interferometer" machte G. W. Pierce (25). Mit dem gleichen Apparat kann auch die Ultraschallwellenlänge durch Verschieben zweier planparalleler Platten (eine davon ist der sendende Quarz) gemessen werden; wobei je nach Abstand der Platten durch Interferenz Auslöschen oder Verstärken der Schallintensität eintritt. Da die Ultraschallwellenlängen in den Größenordnungen der Lichtwellenlängen liegen, stellt eine stehende Ultraschallwelle ein Beugungsgitter für Lichtstrahlen dar. Die bekannten Gitterspektren (bzw. Linien bei monochromatischem Licht) las-

sen sich somit unter Benutzung der als Gitter wirkenden Ultraschallwellen erzeugen. Da die Gitterkonstante gleich der Schallwellenlänge ist, läßt sich diese so auf rein optischem Wege sehr genau ermitteln. Läßt man dünne parallele Lichtstrahlen auf einen Schirm fallen, so entsteht ein Lichtpunktraster, dessen Punkte da, wo die sie erzeugenden Lichtstrahlen die Schallwelle (lies Beugungsgitter) durchlaufen haben, in Richtung der Schallstrahlen in mehrere Punkte auseinandergezogen sind. So markiert sich klar und deutlich der Weg der Schallstrahlen. Mit drei räumlich sich schneidenden Schallstrahlenbündeln lassen sich Bilder herstellen, die denen bei der Interferenz von Röntgenstrahlen an Molekülen (Raumgittern) ähnlich sind.

Ausgehend von der grundlegenden Arbeit von Pierce haben sich dann eine ganze Anzahl Forscher mit diesem Gebiet beschäftigt. Von seinen Schülern ist es vor allem W. H. Pielemeier, der seine Untersuchungen durch zahlreiche Arbeiten weiterführte. Pierce hatte mit dem Ultraschallinterferometer Messungen mit Luft und CO_2 durchgeführt, wobei er bei letzterem Gase für Frequenzen über 200 kHz eine abnorm hohe Absorption feststellte. W. H. Pielemeier (26) setzte diese Arbeiten fort und dehnte sie auf Sauerstoff aus.

Auch in anderen Medien sind ähnliche Versuche über Schallgeschwindigkeit, Absorption des Schalls und Kompressibilität des Mediums gemacht worden. So seien hier nur kurz einige Arbeiten aus der Physik und Chemie erwähnt, die für das Verständnis der Gesamtbedeutung des Ultraschalls unerläßlich erscheinen.

In der Physik spielt die Schallgeschwindigkeitsmessung in den verschiedenen Medien deswegen eine so große Rolle, weil bei diesem neuen Verfahren bereits sehr geringe Mengen des zu untersuchenden Stoffes genügen. Dem Chemiker und Physikochemiker helfen die neuen Verfahren nicht nur zur Feststellung der adiabatischen Kompressibilität, sondern auch beim Bestimmen des Verhältnisses der spezifischen Wärmen. Manche bisher nur umständlich nachweisbaren Erscheinungen lassen sich klarer behandeln, wie z. B. der Zusammenhang zwischen Konzentration und Kompressibilität. Mittels Ultraschalls kön-

nen bereits an kleinen Proben die elastischen Konstanten fester Körper gemessen werden (27). Drückt man beispielsweise einen Glas- oder Kristallwürfel an einen Ultraschallwellen aussendenden Quarz, so treten in dem Würfel in sämtlichen drei Richtungen Schwingungen auf, die mittels einfallenden Lichtes in Form von Beugungsbildern nachgewiesen werden können. Aus der Form der Beugungsbilder lassen sich dann die elastischen Konstanten (Elastizitäts- und Torsionsmodul, Querkontraktion und Poisson'sche Konstante) des untersuchten Würfels bestimmen, sozusagen ablesen.

In der Chemie gelangt der Ultraschall ebenfalls zur Anwendung. Schon Wood und Loomis (28) erwähnen seine Einwirkung auf chemische Vorgänge; insbesondere berichten sie über seine kristallisationsfördernde Wirkung. Die schon in dieser ersten Arbeit angekündigten Untersuchungen von Richards und Loomis (29) enthalten noch zahlreiche weitere. So konnte Stickstofftrijodid unter besonderen Umständen zur Explosion, ferner konnten überhitzte Flüssigkeiten zum Sieden gebracht werden. Gelbes Quecksilberjodid wurde schon unter 120° in rotes verwandelt. In der Kolloidchemie konnten Wood und Loomis (28) die Emulsionsbildung nicht mischbarer Flüssigkeiten z. B. von Benzin, Paraffin und selbst Quecksilber mit Wasser zeigen. In der Technik sind Verfahren mit Ultraschalleinwirkung zum Dispergieren fester Stoffe in Flüssigkeiten erprobt worden. Dies benutzt man auch zum Herstellen feinkörniger photographischer Emulsionen. Ja sogar in die chemische Struktur greift der Ultraschall ein, indem durch ihn hochpolymere Verbindungen abgebaut werden. So konnte A. Szent-Györgyi (30) zeigen, daß Rohrzucker unter Ultraschalleinwirkung in Monosaccharide zerlegt wird. Ebenso wurden Stärke, Gummi-arabicum und Gelatine leicht depolymerisiert; bei Stärke trat an Stelle der blauen die rote Jodreaktion auf, die für Dextrin charakteristisch ist.

Freundlich, Rogowski und Söllner (31) erzielten eine sonst durch Schütteln erfolgende Verflüssigung von thixitropen Gelen auch durch Ultraschalleinwirkung.

Der entgegengesetzte Effekt wird in Gasen erzielt, in denen durch Ultraschall die Staubteilchen durch Anziehung sich zusammenballen und so zum Ausfallen gebracht werden. In der Gasreinigung spielt diese koagulierende Wirkung neuerdings eine große Rolle. Durch die heftigen Druckunterschiede im Strahlfeld des Ultraschalls treten in Flüssigkeiten die gelösten Gase aus, ja sogar zu Kavitation (Hohlraumbildung) kann es kommen, was die Gasausscheidung noch fördert.

Boyle bemerkte bei seinen Versuchen schon 1922 diese „Hohlraumbildung", mit Hilfe derer er ungefähre Wellenlängenmessungen anstellen konnte (32). Um den Vorgang zu klären, führten Boyle's Mitarbeiter Versuche durch, indem sie in eine Glasglocke unten einen Resonator einsetzten und die Glocke mit Wasser füllten; die Glocke konnte dann evakuiert werden. Bei genügender Intensität der Ultraschallwellen schieden sich Bläschen aus; so lassen sich auch beispielsweise Metallschmelzen entgasen.

Desgleichen sind Ansätze vorhanden, den Ultraschall in die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung einzuschalten. Bei größeren Werkstücken, bei denen die Durchleuchtung mit Röntgenstrahlen nicht mehr möglich ist, werden Ultraschallwellen hindurchgeschickt.

Fehlerfreie Metallstücke haben eine sehr große Durchlässigkeit für Ultraschallwellen; dagegen reflektieren z. B. Luftspalte wegen des großen Unterschiedes der Schallwiderstände von Metallen und Luft praktisch vollständig. Es kann ferner bei Ultraschallfrequenzen mit genügend kleinen Wellenlängen gearbeitet werden, sodaß sich die Schallstrahlen gerichtet ausbreiten und eine Aenderung der Strahlrichtung durch Reflexion oder etwas Aehnliches auch an kleinen Fehlstellen festgestellt werden kann. (— Bei größeren Wellenlängen würden die Schallwellen natürlich um das Hindernis herum gebeugt werden.) Die Undurchlässigkeit dünnster Luftspalte macht sich z. B. dadurch bemerkbar, daß es praktisch unmöglich ist, Ultraschallwellen durch einen aufgelegten Schwingquarz in einen Festkörper einzustrahlen, wenn man nicht durch ein Zwischenmedium mit genügender Schalleitung (meist Oel) alle Luftspalten möglichst vermeidet.

Mühlhäuser (33) und Sokoloff (34) haben sich als erste mit dem Problem der Werkstoffprüfung mittels Ultraschall befaßt. So verwendet Mühlhäuser einen Schallgeber und einen Schallempfänger. Er tastet mit beiden den zu prüfenden Stoff ab, um Hohlräume, Tiefen- und Oberflächenrisse festzustellen.

Alle diese Versuche haben jedoch bisher zu keinem für die tägliche Praxis befriedigenden Ergebnis geführt. Und so werden von den verschiedensten Forschern fortlaufend neue Versuche auf diesem Gebiet ausgeführt.

Vielversprechend erscheinen besonders die Versuché von Dr. Pohlmann (Berlin). In einem Vortrag, den die Physikalische Gesellschaft zu Berlin und die Deutsche Gesellschaft für technische Physik in der Berliner Technischen Hochschule veranstalteten, konnte Pohlmann (im April 1940) in Gegenwart führender Physiker über seine Forschungsergebnisse berichten. (Eine schriftliche Veröffentlichung über seine physikalische Versuchsanordnung liegt m. W. zur Zeit noch nicht vor.) Man kann mit Ultraschallwellen, also den nicht hörbaren Wellen, getönte Schwarz-Weißbilder erzielen, Farbenwiedergabe dagegen ist nicht möglich. Diese Schwarz-Weißbilder sind dann gleichsam mit „Schallaugen" gesehen. Sie blicken durch sonst undurchsichtige Stoffe hindurch, und sie können das, weil fast alle Körper schalldurchlässig sind. Zur Abbildung gehört natürlich auch eine Linse, und Pohlmann hat tatsächlich eine Linse geschaffen, durch die die Längswellen eines Ultrakurzwellensenders gesammelt und auf einen Empfänger geworfen werden, der gleichsam an die Stelle einer Mattscheibe tritt. Diese Linse ist eine Cuvette aus dünnen Folien, zwischen denen Tetrachlorkohlenstoff oder Chloroform eingefüllt ist. Die bei dem Vortrag gezeigte Linse ist achromatisch und hat eine Oeffnung von 1 : 1,8. Der mit der Mattscheibe vergleichbare Empfänger besteht aus einer viereckigen Zelle, die mit Xylol gefüllt ist. Darin schweben feinste Aluminiumteilchen, die einen Durchmesser von 20 Tausendstel Millimeter und eine Dicke von $^1/_2$ Tausendstel Millimeter haben. Sie bilden gleichsam das Korn, auf dem man die akustischen Bilder sehen kann,

und dieses ist feiner als die Schallwellenlänge. Die Zelle hat vorn ein Schallfenster und dahinter ein Glasfenster, durch das man einen Lichtstrahl senden kann.

Unter dem Einfluß der Schallwellen werden die kleinen Flitterteilchen der Empfängerzelle gleichgerichtet, und diese molekulare Ordnung ergibt dann das Schallbild. Pohlmann zeigte z. B. ein Metallkreuz, das in einer Flüssigkeit hinter einer Aluminiumplatte verborgen war. Er hatte die Schallenergie auf dieses Kreuz gerichtet. Die zurückgestrahlten Schallwellen wurden von der Schallinse gesammelt, und im Empfänger wurde ein helles Kreuz sichtbar, — um das Bild zu erhalten, braucht man lediglich eine viertel bis eine halbe Sekunde.

Noch eindrucksvoller aber war ein anderer Versuch, der beweisen sollte, daß dieses Verfahren besonders für die Werkstoffuntersuchung von höchstem Wert ist. Es wurden Eisenblöcke von 100 mm Dicke untersucht, die man zur Hälfte mit einem Schnitt von $^1/_2$ mm Stärke oder mit einer Bohrung versehen hatte. Diese Störungen bilden sich, wenn man Ultraschallwellen durch die Blöcke schickt, im Empfänger als Schatten ab, und man kann aus der Brennweite sehr leicht berechnen, wo sich der Schnitt oder die Bohrung befinden. Das ist außerordentlich wertvoll bei der Untersuchung von Metallgefügen, und zwar erscheint es gerade darum so wertvoll, weil die bei allen früheren Versuchen auftretenden Schwierigkeiten, entstanden durch die Eigenschwingung der zu untersuchenden Stoffe, bei diesem neuen Verfahren auf Grund der besseren Versuchsanordnung wegfallen. — Aber auch hier kann noch nichts Abschließendes gesagt werden; die Dinge sind im Fluß, und wir werden in allernächster Zeit mit interessanten Veröffentlichungen zu rechnen haben.

Interessant ist die Erscheinung, daß durch den Schallstrahlungsdruck die über dem Sendequarz befindliche Luft oder Flüssigkeit fortgeschleudert werden (Quarzwind, Oelsprudel!)

Bedeutende Erfolge hat man in der Nachrichtenübermittlung und den damit in Zusammenhang stehenden Gebieten erzielt. Gerichtete Schallwellen von etwa 40 kHz wurden während des Krieges von dem französischen Phy-

siker Langevin (35) zur Auffindung herannahender deutscher Unterseeboote benutzt. Auch für getauchte U-Boote unter sich und mit Ueberwasserfahrzeugen bieten die Ultraschallwellen die beste Verständigungsmöglichkeit, sofern eine allgemeine Ausbreitung des Schalls vermieden werden soll. Durch Modulation mit einer Sprachfrequenz ist sogar Unterwassertelefonie möglich. Inzwischen sind diese Versuche nach dem Krieg ausgebaut worden, und auf vielen Schiffen findet man heute derartige Echolote im Schiffsboden eingebaut, die eine genaue Bestimmung der Meerestiefe ermöglichen.

Eisberge, ja selbst Fischschwärme lassen sich damit auffinden, da der Schallstrahl von den Fischen reflektiert wird. Man erhält in einem solchen Fall ein doppeltes Echo, vom Meeresgrund sowohl wie von den Fischen, sodaß sogar die genaue Tiefe der Schwärme bestimmt werden kann.

Langevins Versuche gaben gleichzeitig den Anstoß zur Untersuchung der biologischen Wirkung des Ultraschalls (21, 36), da er die zunächst völlig rätselhafte Erscheinung beobachtet hatte, daß kleine Fische, die in den Ultraschallstrahl geraten waren, getötet wurden. Die Untersuchung über die Wirkung der Ultraschallwellen haben dann besonders die Amerikaner Wood und Loomis (28) in Baltimore eingeleitet und gefördert.

Aus dem weiteren Bereich der Anwendungsgebiete des Ultraschalls seien nur noch einige aufgezählt: so können explosive Stoffe zum Entzünden gebracht werden. Gewisse Bakterienarten werden abgetötet; man vermag auf diese Weise sogar Milch zu sterilisieren. Seit einiger Zeit finden Ultraschallwellen auch beim Fernsehempfang Verwendung (37, 38, 39).

Nach den Versuchen von Freundlich, Söllner und Rogowski (40), die den Vorschlag zur Diathermie mittels Ultraschallwellen machten, verdienen auch die thermischen Wirkungen unser besonderes Interesse. Die Wärmeentwicklung entsteht in erster Linie infolge der Absorption der Schallwellen in der durchstrahlten Substanz; inwieweit die dabei auftretende innere Reibung und einige andere Erscheinungen noch mitwirken, läßt sich nicht ge-

nau bestimmen. Dognon und Biancani (41) untersuchten die Erwärmung verschiedener Stoffe bei einer bestimmten Schallintensität und erhielten beträchtliche Temperaturerhöhungen, die u. a. bei Wachs in 10 sec. in 2 cm^3 Flüssigkeit bis zu 44° erreichen konnte. Diese Wärmeentwicklung erschwert sehr häufig die Untersuchungen anderer Ultraschallwirkungen, und eine Trennung dieser von den thermischen Vorgängen ist fast nur durch Parallelversuche ohne Ultraschall möglich, um diese Fehler zu vermeiden. Richards (42) weist in einer seiner Arbeiten darauf hin und gibt entsprechende „Abschirmvorrichtungen" an. Besonders starke Erwärmungen entstehen an den Grenzflächen zweier von Ultraschall durchsetzter Stoffe. Wood und Loomis (43) fanden bei ihren ersten Versuchen mit intensiven Ultraschallwellen, daß man ein Thermometer beim Eintauchen in das von Ultraschallschwingungen durchsetzte Oelbad nicht in der Hand halten kann, da die durch Reibung zwischen Glas und Fingern erzeugte lokale Erwärmung zu stark ist, obwohl die vom Thermometer angezeigte Temperatur des Oelbades nur etwa 25° beträgt. Hält man einen Glasfaden von einigen Zehntel mm Stärke zwischen zwei Fingern und taucht das eine Ende, das eine kleine angeschmolzene Kugel trägt, in das Ultraschallfeld, so brennt der Glasfaden eine Rille in die Haut der Finger ein.

Nach diesen Beispielen macht man sich schon ein gutes Bild von der Wärmewirkung des Ultraschalls.

Inwieweit die thermische Wirkung des Ultraschalls eine praktische Nutzanwendung in der Heilkunde finden wird, müssen erst weitere Erfahrungen zeigen. Es liegen dazu bisher noch zu wenig Versuche vor. Eine gewisse Schwierigkeit liegt in der Uebertragung der Schallschwingungen an die zu behandelnde Stelle. Es sind hier mehrere Wege möglich. Entweder taucht man den zu behandelnden Körper in ein zu kräftigen Schwingungen erregtes Flüssigkeitsbad, oder man leitet die hochfrequente Schallenergie über geeignet gebogene Stäbe an die gewünschte Stelle. Letzteres ist jedoch mit einem ziemlichen Energieverlust verbunden.

Es sei jetzt auf eine Reihe von biologischen Effekten hingewiesen, die sich durch Ultraschall erzielen lassen. Wenn man sich an die bisher besprochenen verschiedenartigen Wirkungen dieser hochfrequenten Schwingungen in Flüssigkeiten erinnert und wenn man überlegt, daß die Flüssigkeitsteilchen sehr häufige schnelle und vor allem stark beschleunigte Bewegungen ausführen, so kann man sich vorstellen, daß diese Vorgänge auch auf kleine in der Flüssigkeit befindliche Tier- oder Pflanzenorganismen irgendwie einwirken müssen. So haben verschiedene Forscher festgestellt, daß kleine Tiere durch Ultraschallbestrahlung gelähmt und getötet werden. Infusorien werden zerstört, Algen zerrissen, und bei gewissen Pflanzenzellen wird das Protoplasma von der Zellwand losgelöst und herumgewirbelt. Rote Blutkörperchen werden zerstört, während hingegen der Einfluß auf Bakterien und Krankheitserreger nach den verschiedenen Angaben sehr verschieden sein kann, teils tritt eine Agglutination und ein Nachlassen der Virulenz, teilweise aber auch der entgegengesetzte Effekt auf. Doch scheinen nach den bisherigen Versuchen alle diese Vorgänge auch vorwiegend nur in lufthaltigen Flüssigkeiten besonders wirksam vor sich zu gehen, sodaß es wahrscheinlich ist, daß die bei der Blasenbildung auftretenden physikalischen und chemischen Vorgänge die Hauptursache für die biologischen Effekte sind. (44, 45). Wir wollen nun näher auf die einzelnen hierzu gemachten Versuche eingehen.

Wie bereits erwähnt, zeigte sich erstmalig bei Langevins (14) Versuchen, daß kleine Fische, die in der Nähe des Sendequarzes in den Schallstrahl eines Unterwasserschallsenders gerieten, getötet wurden.

Diese Versuche wurden nun bestätigt und erweitert in der grundlegenden Arbeit von Wood und Loomis (28), die kleine Fische und Frösche durch eine Bestrahlung von 1—2 Min. töteten, während Mäuse, die in einem luftgefüllten Gefäße in die Ultraschallwellen übertragende Flüssigkeit getaucht wurden, eine Behandlung von 20 Min. ohne dauernde Schädigung überstanden. Es gelang den Genannten weiter, einzellige Lebewesen zu töten, Zellen und rote Blutkörperchen zu zerstören. Harvey und Loo-

mis (46) entwickelten dann eine Anordnung, die gestattet, die Ultraschalleinwirkungen unter dem Mikroskop zu beobachten. Sie stellten ebenfalls die Zerstörung von roten Blutkörperchen fest und dehnten die Versuche später auf Froschblutteilchen aus, wo sie auch eine Zerstörung sehen konnten. Die Zerstörung von Bakterien konnte von diesen Forschern nicht beobachtet werden. Bei Elodia und Nitella wurde hingegen das Protoplasma zerstört. Leuchtbakterien in Seewasser zeigten geringeres Leuchten im Vergleich zu unbehandelten Parallelproben gleicher Temperatur. Es konnten lediglich mechanische Wirkungen der Ultraschallwellen festgestellt werden, aber keine durch sie ausgelöste chemische Einwirkung biologischer Art.

Diese Befunde wurden bestätigt durch Arbeiten von Hopwood (47, 48). Der Autor erzeugt bei seinen Versuchen Ultraschallwellen (nach dem Verfahren von Langevin) von 500 000 Hz. Er berichtet zunächst über Versuche mit stehenden Wellen, die durch Streifenbildung in Oel sichtbar werden. Die Wellen mit einer Länge von 2—4 mm verhalten sich bereits so wie Lichtwellen. Nach einigen weiteren physikalischen Versuchen teilt der Verfasser dann seine biologischen Versuche mit. Zellen der Süßwasseralge Nitella werden in kürzester Zeit unter Zertrümmerung des Protoplasmas getötet. Auch rote Blutkörperchen oder kleine Tiere wie Planatorien werden zertrümmert, schlagende Froschherzen zum Stillstand gebracht; ein in Ringerlösung den Ultraschallwellen ausgesetztes Nerv-Muskelpräparat vom Frosch verliert rasch seine Erregbarkeit. Streptokokken werden nach der Einwirkung von Ultraschall rascher agglutiniert, die Virulenz von Pneumokokken wird nicht wesentlich verändert. Auf Vaccinevirus wirkt dagegen die Bestrahlung günstig ein, d. h. seine Potenz wird erhöht; er war nach der Ultraschallbehandlung noch bei größerer Verdünnung als in einem entsprechenden unbehandelten Parallelversuch wirksam.

Von anderen Forschern, besonders einigen Japanern, wurden die Beschallungen auch bei anderen Bakterien angestellt. Nachdem bereits über die chemischen und physikalischen Einflüsse auf das Poliomyelitisvirus Untersuchungen angestellt worden waren, haben Kasahara, Ogata,

Kambayashi und Yoshida (Osaka-Nippon) (49) nun den Einfluß der Ultraschallwellen auf das Poliomyelitisvirus in vitro untersucht. Sie hatten als Versuchstiere Affen, die man mit dem schallbestrahlten Virus impfte. Sie fanden dabei, daß das Poliomyelitisvirus durch 3—5 Minuten lange Einwirkung der ultraakustischen Schallwellen fast vollständig vernichtet wird. Unter zehn Tieren erkrankte ein Affe und zeigte unvollkommene Lähmung, die sich jedoch nach einer Woche bedeutend besserte. — Die Ursache derartiger Wirkung der Ultraschallwellen scheint man in der Oxydation, verursacht durch die intensive Schwingung, suchen zu müssen. Die Verfasser zogen aus den Versuchen den Schluß, daß das Poliomyelitisvirus in vitro durch die Einwirkung der ultraakustischen Wellen fast vollständig vernichtet wird.

Kasahara und Takayi (Osaka) (50) untersuchten den Einfluß der ultraakustischen Wellen auf das Diphtherietoxin und fanden, daß die Toxizität des Diphtheriegiftes durch die U-S-Bestrahlung bedeutend abgeschwächt wird.

Paik, Deutsch und Borkila stellten fest, daß die Ultratonwellen von 280 000 Schwingungen keinen Einfluß auf Staphylokokken, Streptokokken, Friedländerbazillen, Spirochaeta duttoni und Trypanosoma evansi ausüben (51). Eine gewisse Einwirkung zeigt sich bei Ruhramöben; Paramäzien gehen nach 5 Min. zugrunde. Um festzustellen, ob die rasche Zerstörung von einzelligen Organismen durch Hochfrequenzschallwellen mit dem Entweichen gelöster Luft aus dem wässerigen Medium in Zusammenhang stehe, wurden von Johnson (52) folgende Experimente unternommen: Mit Wasser gefüllte Glasröhrchen, die eine große Menge von Protozoen (Stentor, Spirostema, Blepharisma und Paramäcium) enthielten, wurden den Schwingungen eines Quarzkristalloszillators ausgesetzt; die Röhrchen waren mit einer Sauerstoffbombe verbunden, um, wenn nötig, einen äußeren Druck ausüben zu können. Bei Beschallung unter Atmosphärendruck wurde eine lebhafte Entwicklung von Gasbläschen beobachtet und 30 Sek. lange Behandlung genügte, um die Organismen zu zerstören. Die weiteren Versuche wurden mit einem äußeren Druck von 10—60

Pfund pro Quadratzoll ausgeführt; dadurch wurde die Fortleitung der Schallwellen durch die Flüssigkeit in keiner Weise behindert, das Aufsteigen von Gasbläschen sichtbarer Größe dagegen völlig unterdrückt. Bis zu einem gewissen Druck erfolgte die Zerstörung der Organismen wie vorher und in der gleichen Zeit; über diesem kritischen Druck jedoch (scharfe Grenze!) blieben die Protozoen auch durch 2 Min. lange Beschallung völlig unbeeinflußt. Dieser kritische Druck wurde von verschiedenen Faktoren abhängig gefunden, vor allem von der Intensität der U-S-Wellen. Kohlendioxyd, während kurzer Zeit in Blepharisma enthaltendes Wasser eingeleitet, ersetzte die gelöste Luft, ohne anscheinend die Protozoen zu schädigen; es konnte kein merkliches Aufsteigen von Gasblasen in diesem Röhrchen beobachtet werden bei Beschallung während zweier Minuten unter Atmosphärendruck, und nur wenige der Organismen erwiesen sich als beschädigt. Aehnliche Versuche wurden mit roten Kaninchenblutkörperchen, in physiologischer Salzlösung suspendiert, angestellt. Auch hier wurden scharfe kritische Drucke gefunden. Oberhalb des kritischen Druckes sammelten sich die Blutkörperchen an den Knotenpunkten an und wurden auch durch mehrere Minuten dauernde Behandlung nicht zerstört. Unterhalb des kritischen Druckes fand schon nach 30 Sek. Hämolyse statt. Ersatz der Luft durch Kohlendioxyd vermochte die Hämolyse zu verhindern; wurde reiner Wasserstoff oder Stickstoff durch die Flüssigkeit geleitet für 3 Stunden Dauer etwa, so wurde die Zeit, in welcher Hämolyse eintrat, nicht merklich dadurch abgekürzt. Wurden die Blutkörperchen im Vakuum (Entfernung von Sauerstoff, Kohlendioxyd und gelöster Luft) den Schwingungen ausgesetzt, so entstanden die „Schallmuster" und nach etwa 5 Min. beträchtliche Segmentierung; Hämolyse war kaum zu bemerken. Nach Zufuhr von Luft (Sättigung der Körperchen mit Sauerstoff) und erneuter Beschallung bei Atmosphärendruck trat sofort Hämolyse ein. Veränderungen der Schwingungsfrequenz des Oszillators 750 und 1000 Kilozyklen pro Sekunde scheinen die Resultate nicht zu beeinflussen; die Intensität der Energie bildet den Hauptfaktor. Aus den Befunden wird der Schluß gezogen, daß die tödliche Wirkung

der Schwingungen eher auf äußeren als auf innerhalb der Organismen gelegenen Ursachen beruht, und daß diese Ursachen wahrscheinlich mit der Expulsion der im wäßrigen Medium gelösten Luft in Zusammenhang stehen. Diese Versuche wurden von Schmitt und Uhlenmeyer (53) nachgeprüft und voll bestätigt. Es ergab sich weiter, daß durch einen physikalischen oder physikalisch-chemischen Vorgang bei der Bläschenbildung in dem die Zelle unmittelbar umgebenden Medium eine Zerstörung der Plasmamembran eintritt.

Schmitt, Olson und Johnson (54) beobachteten Koagulation von Eialbumin.

H. Wu und S. Liu (55) bestätigten diese Versuche und stellten fest, daß kein Temperatureffekt vorliegen kann. Dagegen ist die Erscheinung von der Bläschenbildung abhängig; sie tritt bei im Medium gelöster Luft, O_2 und H_2 auf, nicht aber bei CO_2 und H_2S oder bei gasfreiem Lösungsmittel. Beckwith und Olson (56) stellten die zerstörende Wirkung der U-S-Wellen auf Hefezellen fest. Zur Erzeugung von Serien hochfrequenter Wellen in Flüssigkeit wurde von denselben ein piëzoelektrischer Quarzkristall in eine dielektrische Flüssigkeit, hier z. B. Xylol, gebracht. Ein Elektrodenpaar wurde auf die entgegengesetzten Seiten des Quarzkristalls gesetzt und mit einem Hochfrequenzoszillator verbunden. Eine derartige Anordnung erlaubt Wellen von Radiofrequenz in der Flüssigkeit zu erzeugen. Die Einwirkung auf Saccharomyces ellipsoides geschah in folgender Anordnung: Die Kultur wurde in ein Glas gebracht, dessen Boden aus einer Cellophanmembran bestand; das Gefäß wurde in das dielektrische Xylol, in welchem sich der Piëzokristall befand, eingetaucht. Diese Anordnung bedingt auch einen sehr geringen Energieverlust. Beim Einschalten des Stroms erschien ein stehendes Wellensystem infolge heftig bewegter Flüssigkeitspyramiden. Temperatursteigerung wurde durch ein Kühlsystem vermieden. In einer Tabelle wurde die Wirkung der Ultraschallwellenvibration auf die wachsende Hefe festgelegt, und zwar durch die Zahl der noch vermehrungsfähigen Zellen. Es zeigte sich ein außerordentlich schneller tödlicher Effekt. Mikroskopisch waren er-

hebliche Mengen von Zelltrümmern und nur einige geformte Zellen festzustellen. Die Weiterverimpfung gibt zumeist eine komplette Sterilisation. Der Tod der Zellen dürfte durch Zerreißung zustandekommen. — Es wäre aber auch ebenso denkbar, daß die von H. Wu und S. Liu (55) beobachtete Koagulation des Proteins zum Tode der Zellen beiträgt. A. Szent-Györgyi (57) konnte keinen Einfluß der Ultraschallwellen auf Ehrlichsche Karzinome feststellen.

Ueber die lokale Wirkung der Ultraschallwellen auf die Haut haben Nakahara, Waro und Ryuji Kobayashi Versuche angestellt (58). Und zwar wurde die Bauchhaut von Ratten 1—2 Min. den Ultraschallwellen ausgesetzt. Nach einer kurzen Latenzzeit trat eine Rötung auf und nach zwei Tagen eine Abschuppung. Die Dauer der Einwirkung hatte keinen Einfluß auf die Reaktionsstärke. Mikroskopisch fand sich lediglich eine Gefäßerweiterung der oberflächlichsten Hautschichten. Es konnte gezeigt werden, daß das Wachstum von intrakutan verimpften Mäusetumoren durch Ultraschallwellen gesteigert wurde, während das von subkutan verimpften jedoch unbeeinflußt blieb.

Neuere biologisch-physiologische Untersuchungen haben Förster und Holste (59) beschrieben: Sie stellten fest, daß die Aktionsströme des Kaltblüterherzens durch Ultraschall verändert werden; gleichzeitig haben sie die Beeinflussung des Wachstums der Hefezellen durch die Beschallung bestätigen können.

Mit der Frage nach den Gründen der Tötung kleinerer Tiere im Ultraschallfeld haben sich auch Frenzel, Hinsberg und Schultes in gemeinsamer Arbeit beschäftigt (60). Die Untersuchungen wurden mit Ultraschall von der Frequenz 500 000 Hz angestellt. Bei Fröschen sind wahrscheinlich Erschütterungsschäden der Gewebe, insbesondere des Zentralnervensystems, die Todesursache. Die Tiere pflegen unter den Zeichen zunehmender Betäubung, häufig verbunden mit Lähmungserscheinungen, besonders der hinteren Extremitäten, einzugehen. Die histologische Untersuchung solcher Tiere, die bis zur Tötung mit Ultraschall beschickt wurden, ergab keine gröberen Zerstörungen, insbesondere keine oder nur unvollkommene Zerreißung von

Gefäßen mit geringfügigen Blutungen, deren Ausmaß nicht als tödlich angesehen werden kann. Dagegen fanden sich bei Fröschen, die durch Ultraschall nicht getötet, sondern nur geschädigt wurden, und die in gelähmtem Zustand eine Reihe von Tagen am Leben erhalten werden konnten, ausgedehnte Blutungen und Erweiterungen im Rückenmark. — Bei Fischen liegen die Verhältnisse etwas anders. Hier muß chemischen Einwirkungen des Wassers, in dem sich die Tiere während des Versuchs befanden, ein wesentlicher Einfluß neben den mechanischen Einwirkungen des Ultraschalls zugeschrieben werden. Im Ultraschall-beschickten Wasser entstehen nämlich Wasserstoffsuperoxyd, Ozon und salpetrige Säure. Diese Substanzen bilden sich wahrscheinlich dadurch, daß die im Wasser gelöste Luft durch die mechanischen Kräfte des Ultraschalls ausgetrieben wird, und daß an den Grenzflächen zwischen Wasser und Luftbläschen elektrische Vorgänge (Doppelschichtensprengung nach Art des Lenard-Effektes?) auftreten, die zu einer Dissoziation der Sauerstoff- und Stickstoffmoleküle der Luft führen.

Freundlich, Söllner und Rogowski (61) schlagen, von einigen Versuchen an frischen Röhrenknochen ausgehend, die Anwendung der Ultraschallwellen zur Knochenmarkstherapie vor. —

Bevor näher auf diese Versuche eingegangen wird, sollen jedoch erst einige physikalische Tatsachen über die Wirkungsweise des Ultraschalls in Erinnerung gebracht werden:

— Die bei Ultraschallbestrahlungen auftretende Wärmeentwicklung findet bevorzugt an den Grenzflächen eines bestrahlten Körpers statt und hat zur Folge, daß jede Struktur innerhalb desselben einer erhöhten Einwirkung unterliegt, während homogene Körper, z. B. Glasstäbe, durch die Schwingungen nur wenig erwärmt werden.

Diese Erfahrungen führten auf den Gedanken, direkt über einen flüssigen oder festen Körper übertragene ultraakustische Schwingungen — unmittelbar als Schwingungsenergie, mittelbar auch als Wärme — therapeutisch ausnutzen zu können. Es wäre dies eine Diathermie mit anderen Mitteln als bisher. Man hat auch zuerst, anscheinend unter dem Eindruck, daß man es mit Schallwellen zu tun hat, bisher

vornehmlich nur Ohrenleiden zu behandeln versucht. Hier wirken die Ultraschallwellen nicht direkt ein, die Energiezuleitung erfolgt vielmehr über eine kurze Luftstrecke.

Eine unmittelbare Uebertragung auf den zu behandelnden Körper nahmen nun Freundlich, Söllner und Rogowski in ihren Versuchen vor, die an einem kleinen frischen Röhrenknochen (Hühnerbein) vorgenommen wurden. Selbiger wurde an mehreren Stellen angebohrt, sodaß man mit einem Thermoelement leicht in den Markkanal kommen konnte. Darauf wurde er, an einem Kupferdraht hängend, mit seinem unteren Ende in einen Oelsprudel gebracht, der in einem Oelbad durch eine mit Hilfe von hochfrequentem Wechselstrom in Schwingungen versetzte piëzoelektrische Quarzplatte erzeugt worden war. Nach einer Minute Einwirkung der Schwingungen wurden die Temperaturen im Markkanal gemessen, und man fand je nach Stärke der verwendeten Wellen Temperaturerhöhungen beliebiger Größe, 10, 15 und mehr Grade. In einem zweiten Versuch konnte gezeigt werden, daß diese Erwärmung im Innern des Markkanals sich nicht nur in dem den Schwingungen direkt ausgesetzten Knochen, sondern über ein Gelenk hinweg auch in dem nächsten Röhrenknochen zeigte. Daraus wurde geschlossen, daß die Schwingung sich über das Gelenk fortpflanzt. Mehrmals konnte beobachtet werden, daß die an den Knochen haftenden Muskelreste unter der Wirkung der Schallwellen bluteten.

Dognon und Biancani (62, 20) untersuchten die Wirkungen der Ultraschallwellen auf isolierte Zellen in Suspensionen; sie studierten dabei hauptsächlich Protozoen, Paramaecium aurelia und Blutkörperchen. Der beobachtete Haupteffekt besteht, wie auch schon andere Autoren feststellten, in einer Zerreißung, gefolgt von einer Auflösung der Zellen. Die verschiedenen Zellarten verhalten sich verschieden. Infusorien geringer Größe erscheinen viel widerstandsfähiger, was man mit ihrer zur Wellenlänge von 6 mm relativen Kleinheit erklären kann. Leberzellen bleiben noch nach mehreren Minuten unbeschädigt. Es gibt auch von der Größe unabhängige Unterschiede, die sich vielleicht mit der Struktur der Zellwand und der Kohäsion des Protoplasmas erklären lassen. Die

Versuche wurden derart vorgenommen, daß sich die Suspensionen in Gefäßen befanden, deren Grund das Schwingungsbad berührte und die mit Eis auf konstanter Temperatur gehalten wurden. Auch die direkte mikroskopische Beobachtung eines auf dem schwingenden Quarz befindlichen Suspensionstropfens wurde ausgeübt.

Bei roten Blutkörperchen besteht ein gewisser Einfluß der Konzentration: Eine genügend verdünnte Blutkörperchensuspension wird nach wenigen Sekunden hämolysiert. Wird aber die gleiche Suspension in eine Röhre von nur 2—3 mm Durchmesser gebracht, so häufen sich die Blutkörperchen in gleichen Abständen an, die den halben Wellenlängen entsprechen, und demonstrieren derart ein System stationärer Wellen (vgl.: die Erscheinungen in der Kundtschen Röhre). Unter diesen Bedingungen tritt bei noch so hoher Intensität und Einwirkungsdauer der Ultraschallwellen keine Hämolyse ein. Es zeigt sich also bei mehr oder minder konzentrierten Blutkörperchensuspensionen folgendes: Die verdünnten weisen wirbelnde Bewegung, verbunden mit Hämolyse, auf. Wird eine bestimmte Konzentration überschritten (dies ist der Fall, wenn 3—4 Tropfen konzentrierte Blutkörperchensuspension auf 2 ccm physiologisches Serum kommen), so findet die schon erwähnte Anhäufung statt. Mikroskopische Beobachtungen zeigten, daß diese Erscheinungen auch von der Tropfenstärke abhängig sind.

Eine bemerkenswerte und für das Verständnis der Ultraschallwirkung wichtige Erscheinung ist beobachtbar, wenn man den Druck in der Röhre, in der die Hämolyse stattfindet, erhöht, etwa bis 1,5 oder 2 Atm. (Ueberdruck von 0,5—1 Atm.) Die Hämolyse tritt dann nicht mehr ein. Das Gleiche ist feststellbar, wenn man den Druck bis auf einige cm Hg erniedrigt. Das Maximum der hämolytischen Wirkung befindet sich bei Atmosphärendruck. Wenn man den auf der unter dem Einfluß der Ultraschallwellen stehenden Blutkörperchensuspension lastenden Druck jäh aufhebt, tritt sofort Hämolyse ein. Langsam greift sie um sich, wenn man nach und nach bei Unterdruck Luft zutreten läßt. Diese Versuche beweisen deutlich die Wichtigkeit gelöster Gase und der Entgasung bei der Wirkung der Ultraschallwellen.

Manche Autoren nehmen zwischen der Entstehung der Gasbläschen und der Zerstörung eine direkte Proportionalität an, was die Autoren dieser Mitteilungen aber nicht glauben, da sie bei mikroskopischer Betrachtung der Präparate oft Zerstörungen ohne die geringste Gasblasenbildung gesehen haben. Die Versuche sprechen für eine rein mechanische Zerstörungswirkung, die an die Vorgänge bei einer Explosion erinnert. In gleicher Weise wurde der Einfluß des Dispersionsmittels geprüft. So kann die hämolytische Wirkung durch verschiedene Modifikationen des gewöhnlichen physiologischen Serums vermindert werden. Zugabe von Gelose übt anscheinend eine mechanisch-schützende Wirkung aus, indem sie die Blutkörperchen mit einer Schicht umgibt. Was den Einfluß von Salzkonzentrationen betrifft, so stellen die Verfasser fest, daß bis 25 v. H. NaCl eine Verminderung der Hämolyse eintritt, die bei höheren Konzentrationen einer Erhöhung weicht; wobei zu beachten ist, daß in diesem Falle NaCl schon selbst hämolytisch wirkt.

Auch bei Infusoriensuspensionen hatte die Ultraschallwelleneinwirkung mechanische Zerstörung durch Zerreißen der Zellen zur Folge. Bezüglich des Einflusses äußerer Faktoren wurden ähnliche Beobachtungen wie bei den Blutkörperchen und noch andere gemacht, die mit der Protoplasmastruktur zusammenhängen. — In gewissen Fällen kann festgestellt werden, daß im Zellinnern Wirbelphänomene ohne Zerstörungen auftreten.

Führt man nach O. Schmitt (63) eine durch den Quarz in Schwingungen versetzte Glasnadel in z. B. ein Seeigelei ein, so weist das Protoplasma eine Viskositätsverminderung auf. Bei mehrzelligen Organismen scheint die Ultraschallwellenempfindlichkeit von ihrer Größe abzuhängen. Kleine Tiere sind empfindlicher als große; ebenso erscheinen Tiere, wie z. B. der Wasserkäfer, infolge des Chitinpanzers, und auch durch anderen Schutz, gegenüber den Ultraschallwellen unempfindlich. Es wurden ferner noch Daphnien, Cyclopen, Würmer (Regen-), Kaulquappen, Frösche und Fische untersucht. Diese Tiere unterliegen krampfartigen Zuständen, die mit der Ultraschallwelleneinwirkung beginnen und aufhören. Darauf folgt eine Phase der Be-

täubung, die bei nicht zu langer Ultraschallwelleneinwirkung reversibel bleibt. Andernfalls stirbt das Tier nach einigen Minuten bei starker, in einigen Stunden bei schwacher Einwirkung. Untersucht man histologisch durch Ultraschalleinwirkung getötete Fische oder besser Frösche, so kann man nur eine einzige, aber besonders gekennzeichnete Schädigung feststellen, die aus einer Zerreißung, aus einer außergewöhnlichen Zerstückelung des gestreiften Muskelgewebes besteht. Alle anderen Gewebe besitzen normales Aussehen.

Bei den Ueberlegungen über die Wirkungsweise der Ultraschallwellen tauchte auch die Frage auf, ob die Diffusionsvorgänge an den Zellmembranen und damit der Stoffwechsel der Zellen durch Ultraschalleinwirkung beeinflußt werden könne. Es wurden zu dieser Frage von Frenzel, Hinsberg und Schultes (64) Modellversuche angestellt, inwieweit man die Diffusionsgeschwindigkeit beeinflussen könne. Es wurde dabei eine Pergamentmembran benutzt, die zwei Gefäße voneinander trennte. In dem einen Gefäße befand sich destilliertes Wasser, im anderen gesättigte Kaliumoxalatlösung, die mittels Ueberschuß von Kaliumoxalat während der Versuche gesättigt gehalten wurde. Die Verfasser fanden bei Gleichrichtung von Schallrichtung und Diffusionsrichtung am 6-Stundenwert gemessen eine Diffusionssteigerung unter Ultraschalleinwirkung von 69 v. H. In der zweiten Versuchsreihe wurden Schallrichtung und Diffusionsrichtung der Oxalatteilchen entgegengerichtet. Auch hier erfolgte eine Zunahme der Diffusionsgeschwindigkeit, aber — am 6-Stundenwert gemessen — jetzt nur um etwa 35 v. H. Angewandt wurden Schwingungen von etwa 540 000 Hz. Es kam den Forschern bei diesen Versuchen nicht so sehr auf die Einzelheiten an, als vielmehr auf die Entscheidung, ob überhaupt eine örtliche Stoffwechselsteigerung durch Ultraschalleinwirkung anzunehmen ist. Weiterhin schien es im Hinblick auf eine etwaige therapeutische Verwendbarkeit der Ultraschallenergie von Interesse, den Einfluß auf Diffusionsvorgänge überhaupt zu untersuchen. Grundsätzlich ist nach den gemachten Versuchen damit zu rechnen, daß therapeutische Wirkungen des Ultraschalls auf dem Wege

örtlicher Stoffwechselsteigerung zu erzielen sind. Es ist zwar anzunehmen, daß die Zunahme der Diffusionsgeschwindigkeit auch als Folge anderer mechanischer Einwirkungen, z. B. niederfrequenter Schwingungsvorgänge und auch bei der Massage auftritt. Es wurden zum Vergleich Versuche mit den Schwingungen eines Pneumomassageapparates, wie er zu Trommelfellmassage gebräuchlich ist, wiederholt und ebenfalls deutliche Diffusionssteigerung erhalten. Aber gegenüber den gebräuchlichen mechanischen Heilmitteln wie Massage, Vibrationen u. ä., hat der Ultraschall den Vorzug der Tiefenwirkung bei gleichzeitiger Richtwirkung, sodaß an besondere Verwendbarkeit in dieser Hinsicht schon gedacht werden kann. —

Zum Beweis für die gute Durchdringbarkeit menschlicher Gewebe für Ultraschall und damit für seine Tiefenwirksamkeit wurden von oben Genannten folgende Versuche unternommen: In der Versuchsanordnung wurde der in einem Gefäß (durch einen im Oelbad befindlichen Quarz) erzeugte Ultraschall in einen oben und unten durch eine dünne Glasplatte verschlossenen und von Wasser durchströmten Messingzylinder geleitet. Eine Gummimanschette bildet das obere Ende des Zylinders zu einem Napf aus, der wiederum mit Wasser gefüllt ist. In dieses Wasser taucht der Handrücken der Versuchsperson, in deren Hohlhand gefärbtes Wasser geschüttet ist. — Der gute Durchgang des Ultraschalls wurde hierbei durch die Oberflächenkräuselung des gefärbten Wassers wiedergegeben.

Hinsichtlich der praktischen Anwendbarkeit des Ultraschalls beim Menschen fanden die Forscher die in ihren Versuchen benutzte Frequenz und Intensität ungeeignet. Sie erzeugte nämlich nach wenigen Sekunden schon eine erhebliche Schmerzhaftigkeit. Es bestätigte sich auch hier die Vermutung, daß es sich bei dem Zustandekommen des Schmerzes um die aus physikalischen Versuchen verschiedener Art bekannte gesteigerte Wirkung des Ultraschalls an Grenzflächen zwischen Medien verschiedener Schallhärte handelt. Wenn nämlich keine Knochen oder Fingernägel, sondern nur Weichteile im Ultraschallfeld lagen, zeigte sich, daß eine schmerzfreie Beschickung möglich war. Bei 5 Minuten langer und längerer Beschickung der Zunge

mit Ultraschall trat kein Schmerz, sondern lediglich ein belangloses Prickeln an der Oberfläche auf. Es sei noch betont, daß allein in der Steigerung der Diffusionsgeschwindigkeit nicht etwa die Grundlage aller biologischen Wirkungen des Ultraschalls gesehen wird. In weiteren Versuchen wurde die Erfahrung gemacht, daß in der Haut durch Ultraschalleinwirkung mannigfache Veränderungen ausgelöst werden. So konnte nachgewiesen werden, daß die Haut nach der Beschallung aufnahmefähiger für Farbstoffe und schließlich auch für Arzneistoffe war. — Mit Fröschen wurde folgender Versuch gemacht: Zwei möglichst gleichartige Frösche wurden in eine wäßrige Methylenblaulösung gesetzt, der eine davon wurde beschallt. Regelmäßig trat bei dem mit Ultraschall behandelten Tier stärkere Blaufärbung auf. Zur Kontrolle wurde nun ein Frosch zunächst in Wasser mit Ultraschall beschickt und zwar nur an einer hinteren Extremität und danach in Methylenblaulösung gesetzt. Es ergab sich, daß in dem vom Ultraschall getroffenen Gebiet auch jetzt eine deutlich stärkere Färbung erfolgte. Bemerkenswert ist, daß sich die Epidermis bei Ultraschall-beschickten Fröschen auffallend leicht von der Cutis abziehen läßt. Noch eindeutiger als Froschversuche fielen nun Versuche an Menschen aus.

Von Holland und Schultes (65) wurde versucht, Histamin mittels Ultraschalls in die intakte menschliche Haut zu treiben. Es gelang auch in wenigen Minuten mit dem Ergebnis deutlicher Quaddelbildung. Beschickt wurde u. a. die Beugeseite des Unterarms. Später wurden die Versuche noch einmal so wiederholt, daß zunächst der Unterarm mit Ultraschall beschickt und dann Histaminlösung auf die soeben behandelte Stelle gebracht wurde. Das Ergebnis war auch hier prompte Quaddelbildung, während bei Kontrollen, auch nach Einmassieren von Histamin keine Quaddelbildung zustande kam. In diesen Versuchen zeigt sich ebenfalls eine therapeutische Möglichkeit, nämlich die der perkutanen Arzneitherapie. Selbstverständlich muß zunächst festgestellt werden, inwieweit der Ultraschall der bisherigen perkutanen Methode überlegen ist. — In dermatologischer Hinsicht ist die Tatsache bemerkenswert, daß beim Eindringen des Histamins auch auf diese Art zunächst

perifollikuläre Oedeme entstehen, erst dann folgt die Bildung der flach erhabenen Quaddel.

Ein neues von Mülwert und Voß angegebenes Verfahren zur Behandlung chronischer Schwerhörigkeit (66) ist die Beschickung des Gehörs mit gerichteten Ultraschallwellen (sog. Schallstrahlen). Das Gehör des Patienten wird nur wenige Minuten der Einwirkung der Schallwellen ausgesetzt. Nach dieser kurzzeitigen Behandlung, die in Zwischenräumen von einigen Tagen 3 bis 9 Mal wiederholt wurde, ergab sich eine langdauernde, allerdings schwankende Besserung der Hörfähigkeit. Durch besondere Vorkehrungen wurde bewirkt, daß die Frequenzen in größeren Bereichen wie 67 000 bis 59 000 oder 34 000 bis 30 000 usw. periodisch geändert wurden.

Die besonderen Merkmale, die den hochfrequenten Schall vor dem gewöhnlich hörbaren Schall auszeichnen, sind, wie wiederholt festgestellt wurde, erstens seine starke Absorbierbarkeit und zweitens seine klare Richtwirkung, die es ermöglicht, ihn wie Lichtstrahlen mit einer Linse zu sammeln bzw. mit Hilfe von Prismen zu brechen. Von Stoffen mit großer innerer Zähigkeit wird er stark absorbiert; dazu gehören die organischen Stoffe z. B. Papier. Ganz dünnes Seidenpapier absorbiert z. B. Schall von etwa 100 000 Doppelschwingungen schon total, während dünne Metallfolie Schall derselben Frequenz und Intensität fast ungeschwächt durchdringen läßt. Diese Erkenntnisse über die verschiedene Absorption in den verschiedenen Stoffen und das Verhalten des Ultraschalls ähnlich den Lichtstrahlen haben unmittelbar erhebliche Nutzanwendung gefunden. Einmal technisch; und zwar gelingt es mit Hilfe der für diese Schallstrahlen so gut durchlässigen Metallfolie, einen sehr empfindlichen Bestrahlungsstärkemesser zu bauen, der auch gebaut ist und zur Dosisbestimmung dient. Er ist schon praktisch angewandt an einem im Besitz der Universitätsohrenklinik in Frankfurt a. M. befindlichen Apparat. Die objektive Bestrahlungsstärkemessung hat sich als unbedingt notwendig erwiesen. Ermöglicht sie doch allein eine einwandfreie Kontrolle dafür, daß tatsächlich beschallt worden ist. Es sind durch diese Versuche große Fehlerquellen ausgeschlossen, denn auch

für den Patienten sind die Strahlen ja subjektiv in keiner Weise wahrnehmbar. Die Vergleichserscheinung der starken Absorption durch organische Stoffe wie Papier jedoch lehrte, daß das Trommelfell ein arges Hindernis für das Eindringen der Bestrahlung ins Ohr bilden kann. Tatsächlich ergaben sich auch in der Therapie häufig bessere Erfolge bei Radikaloperierten. Die Absorption lehrt aber auch, daß bei dem hochfrequenten Schall Knochenleitung weniger gut als Luftleitung stattfinden kann, obwohl noch genauere Versuche darüber, wieweit der Knochen überhaupt hochfrequenten Schall zu leiten vermag, fehlen. Die zweite für den hochfrequenten Schall typische Erscheinung der Richtwirkung äußert sich dadurch, daß sich der hochfrequente Schall, wie das Licht, im wesentlichen nur in gerader Richtung (also als Strahlung) fortpflanzt. Ein gekrümmter Gehörgang ist schon ein starkes Hindernis. Eventuell muß man ihn mit Ohrtrichtern gerade richten und so nachhelfen, um eine genügende Eindringtiefe der Strahlung zu erreichen. Die Erklärung für die Besserung des Gehörs ist vorläufig nur zu mutmaßen. Sicher ist, daß die Schnecke von der Strahlung erreicht sein muß. Wenn die Strahlen bis zur Schnecke vordringen, werden sie wohl nicht nur durch das Fenster, sondern auch durch den Knochen genügend auf das Innere der Schnecke übertragen, weil dann der Weg durch den Knochen nur noch kurz und dementsprechend die Knochenabsorption verhältnismäßig gering ist.

Soweit kann man auf physikalischen Gesetzen aufbauen und erklären, ohne Mediziner oder Physiologe zu sein. Zu dem, was nun bei der Bestrahlung des Gehörs im Cortischen Organ selbst durch die Erschütterung geschieht, fehlen leider die physikalischen Analoga, und man kann darüber nur Hypothesen aufstellen. Jedenfalls bestätigt sich auch hier wie so oft in der Medizin wieder, daß dann Wellenbewegungen, Schwingungen oder Strahlen besonderen therapeutischen Nutzen bringen, wenn ihre Frequenz sehr hoch ist. Im hochfrequenten Schall werden, wie in dieser Abhandlung gezeigt ist, ganz neue biologische Kräfte wach. Aus den Wellen des sichtbaren Lichts werden durch die reine Frequenzsteigerung, ohne daß sich die Natur der Wellen irgendwie ändert, die Röntgenstrahlen mit ihren

bekannten, gänzlich neuartigen diagnostischen und therapeutischen Effekten, die das sichtbare Licht noch nicht hat. Auch die Diathermie arbeitet mit elektrischen Wechselströmen im Gebiet der hohen Frequenzen. Es ist nun jeweils für die Forschung wesentlich, festzustellen, inwieweit sonst schädliche Strhlen der Menschheit nützlich gemacht werden können. Als Vergleichsbeispiel könnte man wieder die Röntgenstrahlen betrachten. Immer wieder sind Fragen der Dosierung und Wellenlänge das Wesentliche.

Auch für die Entwicklung dieser Ultraschallapparatur waren umfangreiche Versuche notwendig, ehe man zur Anwendung der Strahlen beim Menschen schreiten konnte. Es wurde eine Anzahl von Fällen chronischer Schwerhörigkeit, vor allem solche mit Trommelfelldefekten und nicht völlig epidermisierten Radikaloperationshöhlen, vereinzelt auch mit intakten Trommelfellen (Otosklerose), oder vollkommen epidermisierter Radikaloperationshöhle behandelt, und es ist gelungen, eine vielfach überraschende, allerdings mit Wiederverschlechterungen abwechselnde Hörverbesserung zu erzielen. Die angewandte Schwingungsfrequenz bewegte sich zwischen 16750 bis zu 69000 Doppelschwingungen. Am günstigsten erwies sich stets die dicht über der normalen Hörgrenze gelegene Frequenz von 27500 bis 30000 Schwingungen, die deshalb auch meist zur Anwendung gelangte.

Die Besserung des Gehörs wurde geprüft mittels Untersuchung der Hörfähigkeit des Patienten:

1. auf die Flüstersprache,
2. auf die Unterhaltungssprache,
3. auf die untere Tongrenze,
4. auf die obere Tongrenze,
5. auf qualitative — (Weber, Rinne, Schwabach),
6. auf quantitative Aenderungen im Tonbereich.

Es war interessant festzustellen, daß sich der Behandlungserfolg nicht selten nur in der einen oder anderen Richtung bemerkbar machte, während er sich in anderen Fällen sowohl auf Sprach- wie Tonbereich bezog. Ein endgültiges Urteil über die Leistungsfähigkeit der Methode kann jedoch allein auf Grund des bisher noch recht bescheidenen Beobachtungsmaterials nicht gegeben werden.

Aehnliche Versuche wie die oben angegebenen (67) wurden in der Ukraine (Charkow) mit Hilfe von magnetostriktiven Schwingungen in einer Gemeinschaftsarbeit von Ingenieur und Arzt durch Kopilowitsch und Zuckermann angestellt. Von Unterschieden im Untersuchungsmaterial und in den Prüfungsmethoden abgesehen, haben die Versuche nichts Gegensätzliches gezeigt. Die besten Heileffekte wurden hier bei Otitis med. pur. chr. mit großen Defekten des Trommelfells und teilweise auch bei adhäsivem Katarrh erzielt, abgesehen von solchen Fällen, die mit einer Erkrankung des Innenohres kombiniert waren.

Zu den öfters geäußerten Befürchtungen einer möglichen Schädigung des Gehörs durch diese sehr kurzen akustischen Wellen bemerkt Mülwert-Darmstadt in einer besonderen Abhandlung über die Einwirkung auf das innere Ohr (66):

1. wird mit zunehmender Frequenz der Energiebetrag, der noch letzten Endes im inneren Ohr schädigend wirken könnte, bei gleichbleibender applizierter Energie infolge der zunehmenden Absorption kleiner, abgesehen von einer allenfalls möglichen Verstärkung bestimmter Schwingungszahlen durch Resonanz der Basilarmembran.
2. hat die Prüfung des Gehörs von Mülwert selbst trotz seiner nunmehr langjährigen Experimente mit Wellen des ganzen unhörbaren Bereichs eine Schädigung seines allerdings von Anfang an normalen Gehörs bisher nicht ergeben.

In einer späteren Veröffentlichung teilt Voß (68) noch eine Anzahl weiterer Fälle chronischer bzw. subakuter Schwerhörigkeit verschiedener Genese und solche mit subjektiven Geräuschen mit, die durch Bestrahlung mit Ultraschallwellen zum Teil temporär, zum Teil dauernd günstig beeinflußt wurden. Er bringt weiterhin noch einmal die verschiedenen Erklärungsmöglichkeiten für die Wirkungsweise von Ultraschallwellen und im Zusammenhang damit einen Ueberblick der Ansichten verschiedener Autoren darüber.

Zum Problem der Einwirkungen ultraakustischer Schallwellen auf das schwerhörige Ohr schrieb u. a. Per-

witzschky (69) eine kritische Betrachtung über die bisher angestellten Versuche. Er meint, daß den Erfolgen von Mülwert, Voß und anderen Autoren die Mißerfolge Frenzels und Scheiffs (70) gegenüberständen.

Perwitzschky hat nun in zweijähriger Arbeit den Ü-Strahler zunächst physikalisch untersucht und gleichzeitig biologische, chemische und klinische Untersuchungen angestellt. Biologische Untersuchungen über eine Einwirkung der erzeugten Ultraschallwellen auf lebende Organismen (Frosch, Kröten, Forellen-Laich, Dotterbrut, Kaulquappen und Jungfische) sowie Pflanzensamen und junge Pflanzen führten zu keinem positiven Ergebnis. Desgleichen konnte er keinerlei chemische Reaktionen nachweisen. Klinisch wurde der Ü-Strahler nun bei 164 schwerhörigen Ohren angewandt. Bei kritischer Einstellung waren hier 11,5 v. H. Besserungen zu verzeichnen, welche nicht auf die sonst üblichen Schwankungen des Gehörs bei Schwerhörigen zurückzuführen sein können. In 23 von 64 Fällen trat eine Besserung der Ohrgeräusche auf.

Reuter (71) spricht sich anerkennend über die Erfolge mit Ultraschallbehandlung aus. Von 35 behandelten Fällen wurden 23 Fälle gebessert, zwei Fälle möchte er als geheilt bezeichnen, und nicht gebessert wurden 6 Fälle. Vier Fälle von Ohrensausen konnten durch den Ü-Strahler überhaupt nicht beeinflußt werden.

Außer den bisher angeführten Arbeiten über die Behandlung von Schwerhörigkeit mit Ultraschallwellen sind noch eine große Zahl weiterer Arbeiten zum Teil von anderen Autoren erschienen: Genannt seien u. a. Dießbacher (72), Hamm (73), Hegener (74) und Hinsberg (75). — Sie bringen im wesentlichen nichts Neues, sodaß hier nur Hinweise auf die betreffende Literatur gegeben werden sollen.

Eine neue Arbeit über die Anwendung des Ultraschalls auf menschliches Gewebe und die Beschreibung seiner therapeutischen Wirkung an Ischias- und Plexusneuralgie gaben Pohlmann, Richter und Parow (76) in der Deutschen Medizinischen Wochenschrift bekannt.

Die Ausbreitung und Absorption von Ultraschall im menschlichen Gewebe wurde gemessen, die Absorptionskon-

stante für Fett- und Muskelschichten angegeben und die Abhängigkeit der Absorption von der Frequenz gezeigt. Es ergaben sich Absorptionsweiten, die ungefähr denjenigen stark absorbierender homogener Flüssigkeiten entsprechen. Die Einwirkung der Ultraschallstrahlung auf den menschlichen Organismus wurde studiert und es konnte gezeigt werden, daß an Stelle der bekannten destruktiven U.S.-Wirkungen bei hoher Intensität, therapeutische Wirkungen bei geringerer Intensität zu beobachten sind. Die Versuchsprotokolle einer Anzahl von Behandlungen bei Ischias, Plexus-Neuralgie und Arthritis wurden besprochen. Es zeigte sich, daß bei neuralgie-formen Erkrankungen eine gute therapeutische Beeinflussung erzielt wird. In der allgemeinen Auswertung der Arbeiten versuchten die Verfasser zu zeigen, daß bisher in der Biologie aus dem Bestreben heraus, prägnante sichtbare Effekte zeigen zu können, eine starke Ueberdosierung des Ultraschalls vorgenommen worden sei. Intensitäten, die um Größenordnungen höher lagen als diejenigen des akustischen Schalls, wurden angewandt. Naturgemäß waren die dabei erzielten Wirkungen meist zerstörender Natur. Daß die Beurteilung aller bisherigen Ergebnisse bereits größte Vorsicht verlangt, zeigt eine von Korb (77) angegebene Tatsache: Obwohl alle bisher angestellten Versuche zeigen, daß die Ultraschallwellen biologisch wirksam sind, ist für ihre Einführung in die Praxis immer zu berücksichtigen, daß bisher fast nur Reagenzglasversuche ansestellt wurden. Im Organismus liegen die Verhältnisse vielfach ganz anders. Hierfür ein Beispiel aus den Versuchen mit roten Blutkörperchen: Während rote Blutkörperchen in physiologischer Kochsalzlösung verhältnismäßig leicht zerstört werden können, gelingt dies im natürlichen Medium, im Serum in keiner Weise. Selbst nach einer Besendung von einer halben Stunde konnten Blutkörperchen im Serum noch nicht zerstört werden.

Es zeigt sich also, daß die Organismen unter verschiedenen Bedingungen ganz verschieden reagieren und daß sinngemäße Versuche nur unter den Bedingungen vorgenommen werden dürfen, die dem tatsächlichen Anwendungsgebiet entsprechen. Jegliche Strahlungen bei Ueber-

dosierung zeigen destruktive Wirkungen, denen anders geartete Wirkungen bei entsprechender Dosierung gegenüberstehen. Die Anwendungsgebiete des Ultraschalls ergeben sich auf Grund der physikalischen Vorgänge innerhalb der Schallwelle. Infolge der heftigen Kompressions- und Dilatationsvorgänge (der Wechsel von Verdichtungen und Verdünnungen bei der longitudinalen Schwingung des Ultraschalls!) wird sich eine Hyperämie in den Gewebepartien und eine Steigerung des interzellulären Stoffaustausches erreichen lassen. Krankheitsbilder, die Blutstockung und Mangel an Stoffaustausch zur Ursache haben, versprechen somit Erfolge. Ferner zeigten schon vorher angegebene Versuche, daß sich Medikamente auf diese Weise in die Haut einbringen lassen (65). Zu den genannten Wirkungen tritt die thermische Wirkung der Ultraschallstrahlung, mit der sich eine lokalisierte diathermische Behandlung erzielen läßt, deren Tiefenwirkung von der Wellenlänge abhängig ist.

Zu Beginn ihrer Versuche war es für Pohlmann, Richter und Parow (76) notwendig, einige grundlegende Fragen zu klären. Zur Prüfung der schädigenden Dosis der Ultraschallwellen bestrahlte sich einer der Forscher im Selbstversuch an den Fingern mit wachsender Intensität, bis sich ein heftig gerötetes Oedem von 3—4 mm Dicke zeigte, das jedoch nach etwa zwei Stunden restlos verschwand. Um nachzuweisen, daß bei geringeren Dosen keine latenten Schädigungen auftreten, wurden in der Zeit von 8 Wochen täglich 5 Minuten dauernde Bestrahlungen vorgenommen. — Es zeigte sich keinerlei Schädigung. Außerdem wurde mit verschiedenen Wellenlängen der Absorptionskoeffizient im menschlichen Gewebe, d. h. die Tiefenwirkung der Strahlen geprüft. Ausführlich wurde über solche Versuche noch an anderer Stelle berichtet (78). Grundlegend konnte festgestellt werden, daß eine Fettschicht weniger absorbiert als eine Muskelschicht von gleicher Dicke. Und zwar ist das Verhältnis der Stärken der Absorption nach Pohlmanns Veröffentlichung annähernd wie 1:2 (Fett : Muskelschicht). Bei höherer Frequenz zeigte sich eine stärkere Absorption als bei niederer. Hieraus folgt, daß zur Behandlung von Hautkrankheiten zweck-

mäßig eine höhere Frequenz zu wählen ist als bei tiefliegenden Organen. Die bei allen diesen Versuchen angewandte Apparatur bestand aus einem leicht transportablen Hochfrequenzgenerator. Die Wechselspannung des Hochfrequenzgenerators gelangte über biegsame Zuleitungen zum Ultraschallerzeuger, der in Form eines leicht beweglichen kleinen Massageknopfes ausgebildet war und massierend über die zu behandelnden Körperstellen bewegt wurde.

Es kann im Hinblick auf die Heilungstendenz gesagt werden, daß alle Patienten mit Ischias- und Plexusneuralgie gute Erfolge zeigten, während die Arthritisbehandlung, wie von vornherein zu erwarten war, sich als nicht erfolgreich erwies. Ob die Ursache der Erfolge mit diesem Apparat in der intensiven Tiefenmassagewirkung und Anregung des interzellulären Stoffaustausches, in der diathermischen Wirkung oder dem Einfluß der eingebrachten Medikamente zu suchen ist, ist noch nicht restlos geklärt.

Mit der Herstellung von Ultraschallgeräten befassen sich die Firmen Atlas-Werke in Bremen, Debeg in Hamburg, Elektroakustik in Kiel, Radio-Loewe in Berlin, Steeg und Reuter in Bad Homburg und Siemens-Reiniger-Veifa in Erlangen (aus deren Kurzwellenlaboratorium auch der zuletzt genannte Apparat stammt). Einen Ultraschallgenerator für Versuchszwecke hat auch die Firma „Société S. C. A. M." in Paris gebaut; Erfahrnugen mit diesem Gerät liegen in Form einer Veröffentlichung m. W. bisher noch nicht vor. Bei allen Firmen befindet sich die Apparatur noch in der Prüfung, einzelne, z. B. Radio-Loewe, stellen nur Teile dafür her. Andere wieder stellen Spezialgerät (Echolote) her, z. B. Atlas, Bremen.

Zusammenfassung.

Im ersten Teil der Arbeit wurde versucht, einen Ueberblick über die Physik und Chemie der Ultraschallwellen zu geben, was in Anbetracht der Größe des Gebietes und der Kompliziertheit der neueren technischen Anwendungsmöglichkeiten des Ultraschalls nur oberflächlich erfolgen konnte. Es liegen in diesen Fragen bereits viel bessere Bücher und Zusammenfassungen vor, unter deren Autoren ich u. a. nur Bergmann, Hiedemann, Scheibe und Rum-

pel (79) nennen möchte. Es wurden aus dieser Ueberlegung heraus nur die die Erzeugung von Ultraschall und alle für das Verständnis der Wirkungen in Biologie und Medizin unbedingt wichtigen Erscheinungen behandelt. Die vielen Literaturangaben bieten die Möglichkeit die einzelnen Unterlagen in der Urschrift nachzulesen.

Im zweiten Teil wird eine Zusammenfassung der Arbeiten über biologische und medizinische Wirkungen gebracht. Die ausländische Literatur war größtenteils nicht in der Urschrift erreichbar und mußte daher aus Uebersetzungen entnommen werden. Besonders ausführlich wurden die bisher einzigen therapeutischen Behandlungserfolge mit Ultraschall: Versuche zur Besserung von Schwerhörigkeit und die Behandlung von Ischias- und Plexusneuralgie wiedergegeben.

Es ist nach allen bisherigen Versuchen anzunehmen, daß die Medizin in enger Zusammenarbeit mit der Technik die Anwendungsmöglichkeiten des Ultraschalls weiter prüfen wird und daß nach systematischem Arbeiten weitere Fortschritte und Erfolge errungen werden. Die vorliegenden therapeutischen Ergebnisse sind bisher noch zu wenig überprüft, als daß man sie schon in die praktische Medizin übernehmen könnte.

Ich möchte an dieser Stelle dem Herrn Professor Dr. med. W. Haase (Chirurgische Universitätsklinik Berlin-Ziegelstraße) für die Stellung des Themas und die freundliche Ueberlassung eines Teils der neueren Literatur und für die bei der Fertigstellung der Arbeit erteilte Beratung danken.

Schrifttum.

1. Edelmann: Studien über Erzeugung sehr hoher Töne vermittels der Galtonpfeife. Ann. Phys. IV. Folge, Bd. 2.
2. Hartmann: A new method for the generation of sound waves. — Phys. Rev. II. Folge, Bd. 20 (1932).
3. Holtzmann: Eine mächtige Quelle kurzer Schallwellen. Phys. Z. Bd. 26 (1925).
4. Altberg: Ueber kurze akustische Wellen bei Funkenentladungen von Kondensatoren. Ann. Phys. IV. Folge, Bd. 23.
5. Mülwert: Eine neue Methode zur Erzeugung sehr kurzer akustischer Wellen. — Arch. f. Ohren- usw. Heilkunde. Bd. 125 (1930).
6. Joule: On the effects of magnetism upon the dimensions of iron and steel bars. — Phil. Mag. III. Folge, Bd. 30.
7. Pierce: Magnetostriction oscillators . . . Proc. Amer. Acad. Boston, Bd. 63 (1928).
8. Pierce u. Altherton Noyes: An improved magnetostriction oscillator. J. accust. Soc. Amer. Bd. 9, (1938).
9. Giebe u. Scheibe: Eine einfache Methode zum qualitativen Nachweis der Piëzoelektrizität von Kristallen. Ztschr. f. Phys. Bd. 33 (1925).
10. Hettisch: Beiträge zur Methodik der Kristallklassenbestimmung. Z. Phys. Bd. 50. (1928).
11. Curie, J. u. P.: Développement par pression de l'électricité polaire dans les cristaux hémièdres à faces inclinées. C. R. Acad. Sci., Paris. Bd. 91 (1880).
12. Scheibe: Piëzoelektrizität des Quarzes. 1938. Verlag Steinkopf, Dresden u. Lpz.
13. Cady: The piezo-electric resonator. Proc. inst. Radio Engrs. N. Y. Bd. 10.
14. Langevin: Sondage par le son. Spec. Publ. intern. Hydogr. Bureau Monaco Nr. 3.
15. Straubel: Direkte Kristallsteuerung für ultrakurze Wellen. Phys. Z. Bd. 32 (1931).
16. Gruetzmacher: Piëzoelektrischer Kristall mit Ultraschallkonvergenz. Z. Phys. Bd. 96.
17. Wood u. Loomis: The physical and biological effects of high-frequency sound-waves of great intensity. Phil. Mag. VII. Folge, Bd. 4.
18. Kundt: Ueber akustische Staubfiguren. Pogg. Ann. Bd. 127 (1866).
19. Richards: Proc. Nat. Acad. Amer. 15 (1929).
20. Dognon u. Biancani: Ultra Sons et Biologie. Paris. Gauthier-Villars. 1937.

21. Langevin: Sondage par le son. Spec. Publ. intern. Hydogr. Bureau Monaco Nr. 3 (1924).
22. Hehlgans: Ueber Piëzoquarzplatten als Sender und Empfänger. Ann. Phys. Bd. 86, (1928).
23. Toepler: Beobachtungen nach der Schlierenmethode. Ostwalds Klassiker Bd. 158.
24. Pohlmann: Sichtbarmachung von Ultraschall in Gasen. Naturwiss. Bd. 23 (1935)..
25. Pierce: Piëzo-electric oscillators. Proc. Amer. Acad. Boston Bd. 60.
26. Pielemeier: Phys. Rev. (2) 36 (1930).
27. Bergmann: Der Ultraschall. VDI-Verlag, Berlin..
28. Wood u. Loomis: Phil. Mag. (7) 4 (1927).
29. Richards u. Loomis: Journ. Amer. Chem. Soc. 51, (1927).
30. Szent-Györgyi: Nature 131 (1933).
31. Freundlich, Söllner u. Rogowski: Koll. Beih. 37 (1933).
32. Boyle u. Taylor: Phys. Rev. (2) 27 (1926).
33. Mühlhäuser: Verfahren zur Werkstoffprüfung. D.R.P. 569 598.
34. Sokoloff: Phys. Z. Bd. 36 (1935).
35. Langevin: Franz. Pat. 502 913 (1918).
36. Marinesco: Propriétés piezochimiques, physiques et biophysiques des ultra-sons. Paris 1937.
37. Becker: Eine fast trägheitslose Lichtsteuerung mittels Ultraschallwellen. Z. f. Hochfrequenztechnik. Bd. 1, 48 (1936).
38. Maercks, O.: Phys.. Z. Bd. 37 (1936).
39. Hanle u. Maercks: Verh. dtsch. phys. Ges. III. Folge Bd.. 19. (1938).
40. Freundlich, Söllner u. Rogowski: Ueber einige biologische Wirkungen von Ultraschallwellen. Klin. Wschr., Bd. 11 (1932).
41. Dognon u. Biancani: Ultra-sons et Biologie. Paris. Gauthier et Villars, 1937.
42. Richards: Proc. nat. Acad. Sci., Wash. Bd. 17 (1931).
43. Wood and Loomis: The physical and biological effects of high frequency sound-waves. Phil. Mag. VII. Folge. Bd. 4 (1927).
44. Hiedemann: Ultraschall. Ergebn. d. exakt. Naturwiss. 14 (1935).
45. — Verfahren und Ergebnisse der Ultraschallforschung. VDI 80 (1936).
46. Harvey and Loomis: Nature 121 (1928).
47. Hopwood: Nature 128 (1931).
48. Hopwood and Lloyd: Ultraschall. Einige Eigenschaften unhörbarer Töne. Proc. roy. inst.. Great Britain. 26, 339 (1931).
49. Kasahara, Ogata, Kambayashi u. Yoshida: Ueber den Einfluß der Ultraschallwellen auf das Poliomyelitisvirus in vitro. Mschr. f. Kinderhlk. Bd. 73 (1938).
50. Kasaharau. Takayi: Ueber Beeinflussung des Diphtherietoxins. Mschr. f. Kinderheilk. 72 (1938).
51. Paik, Deutsch u. Borcila: Action des Ultrasons sur des microbes les protozoaires et les infusoires. C. r. Soc. Biol. 119 (1935).

52. Johnson: The lethal effects of ultrasonic radiation. J. of Physiol. 67 (1929).
53. Schmitt u. Uhlenmeyer: Proc. Soc. Exp. Biol. and Medic. 27.
54. Schmitt, Olson u. Johnson: Proc. Soc. Exp. Biol. and Medic. 28.
55. H. Wu und S. Liu: Proc. Soc. Exp. Biol. and Medic. 28.
56. Beckwith and Olson: Proc. Soc. Exp. Biol. and Medic. 29 (1932).
57. Szent-Györgyi: Nature 131 (1933).
58. Nakahara, Waro und Kobayashi: Biological effects of short exposure to supersonic waves. Zbl. f. Haut- u. Geschlechtskrankh. Bd. 50 (1935).
59. Förster u. Holste: Naturwissenschaften 25.
60. Frenzel, Hinsberg u. Schultes: Probleme der ultraakustischen Schallwellen hinsichtlich ihrer biol. Wirkungen. Zbl. f. Ohren- usw. -Heilkunde. Bd. 40 (1935).
61. Freundlich, Söllner u. Rogowski: Einige biologische Wirkungen von Ultraschallwellen. Klin. Wschr. Bd. 11, Nr. 36 (1932).
62. Dognon u. Biancani: Les ultrasons et leurs actions biologiques. Journ. Physiol. et Path. gén. 32 ((1934).
63. O. Schmitt: Protoplasma (Berl.) 7, 332 (1929).
64. Frenzel, Hinsberg u. Schultes: Ueber den Einfluß des Ultraschalls auf Diffusionsvorgänge. (Nebst Bemerkungen über seine Wirkungen auf menschliches Gewebe). Z. f. exper. Med. Bd. 96 (1935).
65. Holland und Schultes: Ueber die Erzeugung von Histaminquaddeln durch Ultraschall. Z. f.. exper. Med. Bd. 98 (1936).
66. Mülwert u. Voß: Eine neue physiologische Behandlungsmethodik chronischer Schwerhörigkeit und deren Behandlungsergebnisse. Arch. f. Ohren-, usw. Heilk. Bd. 119 (1928).
Mülwert: Verh. d. Ges. dtsch. Hals- usw. Aerzte 1930, 452.
67. Kopilowitsch u.. Zuckermann: Arch. Hals- usw. Heilk. 131, 208.
68. Voß: Ultraschallwellen im Dienste der Behandlung chronischer Schwerhörigkeit. Arch. f.. Ohren- usw. Heilk. 135.
69. Perwitschky: Zum Problem der Einwirkungen ultraakustischer Schallwellen auf das schwerhörige Ohr. Folia otolarygologica, Bd. 37, 73.
70. Frenzel u. Scheiff: Zbl. f. Hals-, Nasen-, Ohren. Bd. 19.
71. Reuter: Zbl. f. Hals, Nasen, Ohren, Bd. 19.
72. Dießbacher: Ein Beitrag zur Behandlung chronischer Schwerhörigkeit. Vasalva 1932, Nr. 14.
73. Hamm: Klin. Wschr. 1930, Nr. 37.
74. Hegener: Zbl. f. HNO-Heilk. 31, H. 2/5.
75. Hinsberg: Zbl. f. HNO-Heilk.. 31 H. 2/5.

76. Pohlmann, Richter u., Parow: Ueber die Ausbreitung und Absorption des Ultraschalls im menschlichen Gewebe und seine therapeutische Wirkung an Ischias- und Plexusneuralgie. Dtsch. Med. Wschr. 65. Jg. (1939), S. 251.
77. Korb: Radiol. Rdschr. 1936, Bd. 5, S. 168.
78. Pohlmann: Absorptionsmessungen. Phys. Ztschr. (1939) Bd. 40 H. 5.

79. *Einige größere Arbeiten über Ultraschall:*

Bergmann, L.: Ultraschall und seine Bedeutung in Wissenschaft und Technik. Z. Naturwiss. Bd.. 4 (1938), S. 53.
— Der Ultraschall. VDI-Verlag Berlin (1939).
Hiedemann, E.: Ultraschallforschung. Walter de Gruyter u. Co.-Verlag. Berlin 1939.
— Ultraschall. Ergebn.. exakt. Naturwiss. Bd. 14 (1935).
— Verfahren und Ergebnisse der Ultraschallforschung. Z. VDI Bd. 80 (1936).
Scheibe: Die Piëzoelektrizität des Quarzes. 1938.
Rumpel (Erlangen) Physik der Ultraschallwellen.

Lebenslauf.

Ich wurde am 23. 11. 1915 als Sohn des Studienrats Dr. Friedrich Schubotz in Berlin geboren. Daselbst besuchte ich vom Jahre 1922—1925 eine private Vorschule und von 1925—1934 die höhere Knabenschule. An der Oberrealschule zu Berlin-Lichterfelde bestand ich Ostern 1934 das Abitur.

Darauf trat ich als 1½jährig-Freiwilliger in die Reichswehr (1./I.R. 5 Stettin) ein und wurde von dort zur Militärärztlichen Akademie Berlin übernommen. So begann ich an der Friedrich-Wilhelms-Universität Medizin zu studieren. Nach dem Physikum besuchte ich je ein Semester die Universitäten Hamburg und München.

Bei Kriegsbeginn mußte ich mein Studium unterbrechen und fand bis zum Januar 1940 Verwendung in verschiedenen Truppenteilen. Im Januar 1941 beendete ich das medizinische Staatsexamen in Berlin.

Berlin, im Januar 1941. F. Schubotz.